N° d'ordre au C.N.R.S.
AO. 11432

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR - INGENIEUR

par

Jean-Claude MEURGEY

SONDE THERMOMETRIQUE DE SURFACE ET SES DISPOSITIFS DE REGULATION ET DE COMMANDE D'ENREGISTREMENT

Soutenue le 28 MAI 1975

MM.	A. COLOMBANI,	Professeur à la Faculté des Sciences de ROUEN.	Président
	J. GOUAULT,	Professeur de Physique à l'Université de ROUEN.	Rapporteur
	R. GUILLIEN;	Professeur de Physique à l'Université de NANCY. Directeur de l'Institut de Génie Biologique et Médical de NANCY.	Examinateurs
	M. SAMSON,	Professeur agrégé à la Faculté Mixte de Médecine et de Pharmacie de ROUEN.	
	R. DOLEZ,	Chef du Département ENGINEERING d'Esso Chimie .	

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544702_0013

N° d'ordre au C.N.R.S.
AO. 11432

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE ROUEN

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR - INGENIEUR

par

Jean-Claude MEURGEY

SONDE THERMOMETRIQUE DE SURFACE ET SES DISPOSITIFS DE REGULATION ET DE COMMANDE D'ENREGISTREMENT

Soutenue le 28 MAI 1975

MM.	A. COLOMBANI,	Professeur à la Faculté des Sciences de R O U E N.	Président
	J. GOUAULT,	Professeur de Physique à l'Université de R O U E N.	Rapporteur
	R. GUILLIEN;	Professeur de Physique à l'Université de N A N C Y. Directeur de l'Institut de Génie Biologique et Médical de N A N C Y.	Examinateurs
	M. SAMSON,	Professeur agrégé à la Faculté Mixte de Médecine et de Pharmacie de R O U E N.	
	R. DOLEZ,	Chef du Département ENGINEERING d'Esso Chimie .	

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

A mes Parents

A ma Femme

A mes Enfants

Monsieur le Professeur COLOMBANI a suivi mon travail avec bienveillance . Je le prie de trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance .

J'exprime mon entière gratitude à Monsieur le Professeur GOUAULT qui a assuré la direction de ce travail , réalisé au Laboratoire de Thermoélectricité de la Faculté des Sciences de Rouen .

Je remercie Monsieur le Professeur SAMSON qui a bien voulu que des relevés de température, concernant les affections carotidiennes , soient effectuées dans son Service Neurologique de l'Hotel Dieu de Rouen .

Je remercie Monsieur le Professeur R. GUILLIEN, qui a bien voulu accepter de juger ce travail.

Que Messieurs LE GUERN, Directeur, et DOLEZ, Chef du Département Engineering de la Société ESSO-CHIMIE, qui m'ont fait l'honneur de s'intéresser à mon travail, veuillent bien trouver ici l'expression de mes sincères remerciements.

sommaire

S O M M A I R E

° °
°

INTRODUCTION

I . POSITION DU PROBLEME : LE CAPTEUR

I.1. Description abrégée et comportement

I.1.1. Préambule
I.1.2. Constitution
I.1.3. Comportement

I.2. Nature du travail effectué

I.2.1. La sonde
I.2.2. Système de régulation
I.2.3. L'enregistrement
I.2.4. Repérages de θp et $\theta réf$

II . SONDE MINIATURE

II.1. Les thermistances

Caractéristique : résistance fonction de la température

II.2. Description de la sonde

II.3. Avantages

Annexe 1 : Rappels sur les thermistances

III . DISPOSITIF DE REGULATION

Introduction

III.1. Comportement thermique de la sonde

III.1.1. Modèle thermique
III.1.2. Equations thermiques
III.1.3. Diagramme fonctionnel de la sonde
III.1.4. Détermination expérimentale des coefficients relatifs aux fonctions de transfert

III.2. Etude théorique du servo-système

III.2.1. Expression de l'écart de commande
III.2.2. Diagramme fonctionnel et équations
III.2.3. Conception du régulateur

III.3. Réalisation du régulateur

III.3.1. Choix des éléments constitutifs
III.3.2. Les amplificateurs opérationnels
III.3.3. Production du signal de mesure
III.3.4. Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée
III.3.5. Amplificateur de puissance
III.3.6. Fonctionnement en adaptateur de température
III.3.7. Ensemble complet de régulation
III.3.8. Etude de la stabilité

III.4. Performances

III.4.1. Fonctionnement en barrière thermique
III.4.2. Fonctionnement en adaptateur

IV . REPERAGE DE θp ET $\theta réf$

IV.1. Production du signal de mesure

IV.1.1. Principe
IV.1.2. Réalisation

IV.2. Repérage de θp

IV.2.1. Principe de détection
IV.2.2. Amplificateur inverseur
IV.2.3. Amplificateur différentiateur
IV.2.4. Monostable
IV.2.5. Réalisation

IV.3. Repérage de $\theta réf$

IV.3.1. Principe de détection
IV.3.2. Réalisation

V . ENREGISTREMENT

V.1. Enregistrement de θ en fonction du temps

V.1.1. Relevés de température cutanée par contacts brefs
V.1.2. Relevés de température par contact permanent

V.2. Enregistrement sur table X-Y

V.2.1. Commande Y et du stylet scripteur
V.2.2. Commande X
V.2.3. Exemple d'enregistrement

VI . SYSTEME LOGIQUE ASSOCIE

VI.1. Problèmes posés

VI.1.1. Repérage de θp

VI.1.2. Repérage de $\theta réf$

VI.1.3. Enregistrement sur table X-Y

VI.2. Mise en équations

VI.3. Diagramme des signaux

VI.4. Réalisation

VI.4.1. Schéma de principe

VI.4.2. Choix du matériel

VI.4.3. Fonctionnement et montage réalisé

VII. RESULTATS ET APPLICATIONS

VII.1. Performances de l'appareillage

VII.2. Présentation

VII.3. Applications médicales

VII.3.1. En neurologie

VII.3.2. Mastopathies

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

introduction

I N T R O D U C T I O N

° ° °

L'utilisation d'appareils industriels de thermovision basés sur la cinématographie indirecte des infra-rouges a rendu possible l'application pratique de la thermographie à la médecine . Cette technique permet la mise en évidence des troubles circulatoires des membres et le dépistage des tumeurs , en particulier des cancers du sein . En neurologie , E.H. Wood en 1964-1965 a montré , le premier , la valeur de la thermographie faciale comme moyen diagnostic de la thrombose de la carotide grâce à l'individualisation d'un territoire frontal sus-orbitaire interne paramédian dépendant de la circulation carotidienne .

Cette première technique , fondée sur une véritable cartographie des radiations thermiques émises par l'organisme est séduisante par son innocuité et sa fidélité. Ses inconvénients sont de ne pas donner directement des résultats chiffrés des tempé-ratures cutanées et surtout le coût élevé de l'appareillage utilis

Une seconde méthode , basée sur l'utilisation des cristaux cholestériques qui ont la propriété de réfléchir la lumièr blanche selon certaines couleurs qui la composent . Au contact de la peau , la plaque change de couleur en fonction des gradients de température . Cette technique , rapide et facile à mettre en oeuvr est utilisée dans les consultations de dépistage et principalement dans les cas d'affection du sein . Cette méthode de thermométrie présente cependant deux inconvénients majeurs :

. l'échange de chaleur entre la plaque et la peau introduit des modifications de la température initiale de celle-ci

. ne donnant pas de résultats chiffrés , l'appréciation visuelle est , certes, limitée .

° ° °

Nous nous proposons de perfectionner une autre méthode de mesure de température cutanée , par contact , qui est utilisée depuis 1967 dans la clinique neurologique de l'Hôtel Dieu de Rouen .

Le capteur thermoélectrique de contact est constitué par une sonde comprenant principalement :

. une fine thermistance insérée dans un pont ou une soudure chaude de thermocouple fixée à l'extrémité plane d'un cylindre en matériau diélectriquement isolant . La tension de sortie du pont ou la force électromotrice engendrée par le thermocouple , fonction de la température , est enregistrée .

. une région C du support isolant , proche de l'extrémité sensible de la sonde , est régulée à une température fixe ou variable grâce à un système asservi commandant le dégagement de chaleur dans une résistance logée dans C .

Afin de perturber le moins possible la température préexistante , il est naturellement indispensable que les dimensions des sondes soient aussi réduites que possible .

Un tel dispositif trouve deux genres d'applications distinctes :

. l'exploration ponctuelle de région cutanée , par exemple par contacts de courtes durées , le support se comportant en barrière thermique .

. l'évolution d'une température , par contact permanent pour un point cutané , au cours d'un traitement , le support se comportant alors en adaptateur de température .

L'expérience acquise durant ces quelques années d'utilisation de cette méthode nous a rapidement conduit à réaliser un appareillage précis , fiable , robuste , d'emploi aisé , peu encombrant , facilement transportable , comprenant :

. une sonde miniature

. une régulation de température précise (1/20 °C)

. un signal de mesure haut niveau (0,4V/°C) permettant l'utilisation d'un enregistreur peu couteux , donnant la courbe de la température cutanée en fonction du temps dans le cas d'exploration de différents points .

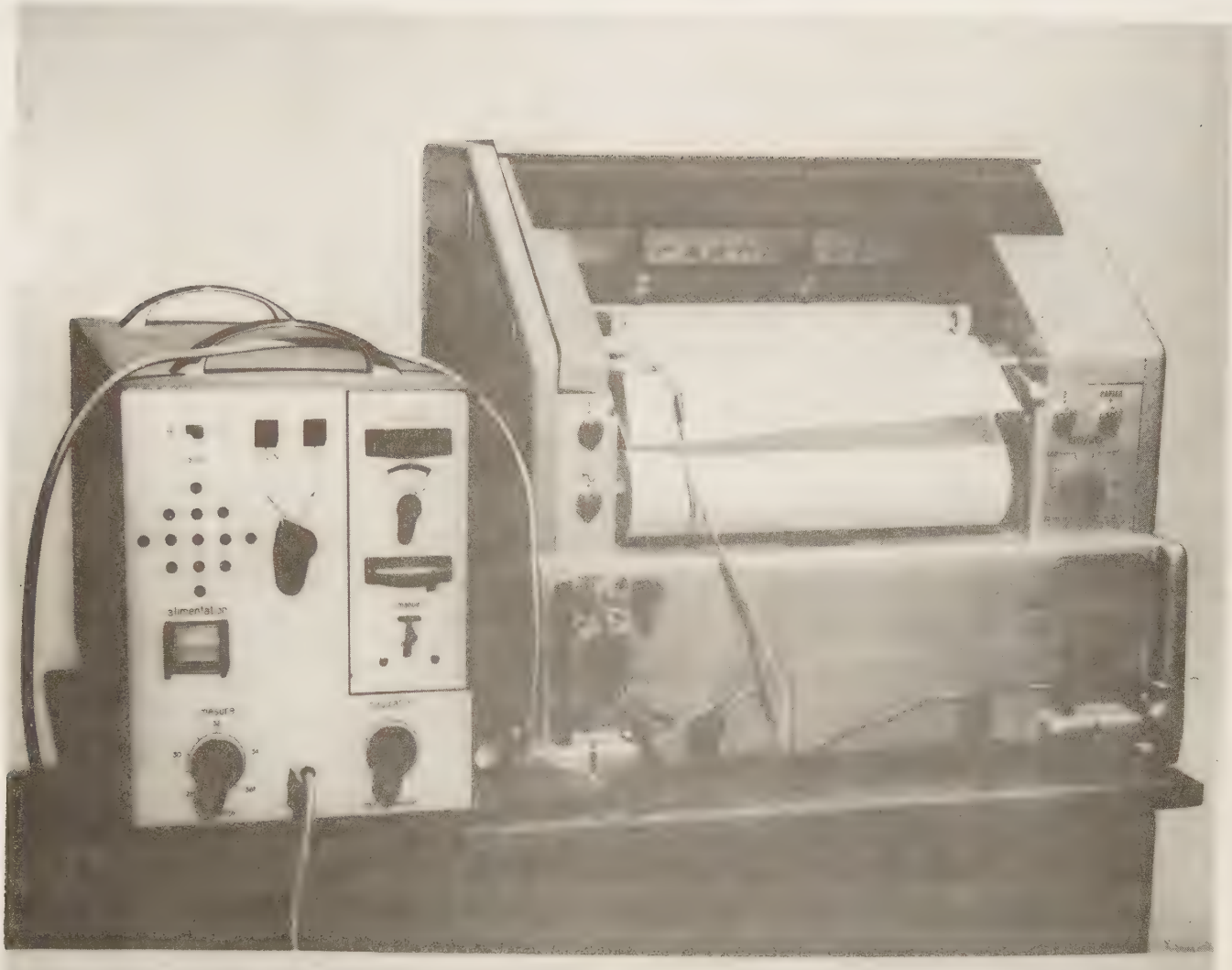
. un dispositif d'enregistrement sur un traceur X Y ,

. . .

permettant l'inscription directe des repères thermiques θp (température de pic) correspondant à chaque point cutané , le thermodigramme étant obtenu en reliant ces repères . En cas de mesures symétriques , les repères de deux points gauche et droit sont automatiquement inscrits sur la même verticale avec des symboles différents , mettant ainsi en évidence les moindres assymétries thermiques .

Après avoir présenté le problème de l'utilisation de cette méthode en médecine pour la recherche des zones isothermes du corps et le diagnostic d'états pathologiques , nous décrirons l'appareillage complet que nous avons réalisé et nous donnerons quelques exemples d'application .

CHAPITRE 1



APPAREILLAGE ETUDIE ET REALISE ANTERIEUREMENT

I . P O S I T I O N D U P R O B L E M E : L E C A P T E U R

I.1. DESCRIPTION ABREGEE ET COMPORTEMENT D'UN CAPTEUR THERMOELECTRIQUE DE CONTACT ETUDIE ET REALISE ANTERIEUREMENT :

I.1.1. Préambule : L'étude thermocinétique(1,2) , les étapes de réalisation (2) .et certaines applications médicales neurologiques (3),(4), (5),d'un capteur thermométrique de surface construit au laboratoire ont fait l'objet de travaux présentés par Faure (6), Meurgey (7), Avenel (8), Boutin (9), Chomant (10),et Coen (11) . Ce capteur fonctionne cliniquement dans le service neurologique de l'Hotel Dieu de Rouen . Il permet d'y pratiquer des opérations thermographiques ponctuelles pour le dépistage de sténoses et thromboses de carotides , grâce à une sonde régulée en température dotée d'éléments thermométriques à thermocouples .

I.1.2. Constitution : Il comprend les organes suivants : (12)

- la sonde proprement dite (figure I.1.2a) :

elle se compose d'un cylindre en altuglas possédant une partie terminale tronconique.

Sur la face plane de cette partie,est fixée une soudure chaude S de thermocouple dont les fils de liaison , noyés dans la masse isolante , débouchent à l'extérieur .

Une compensation de soudure froide étant pratiquée , la f.e.m. du thermocouple est fonction de la température θ de S .

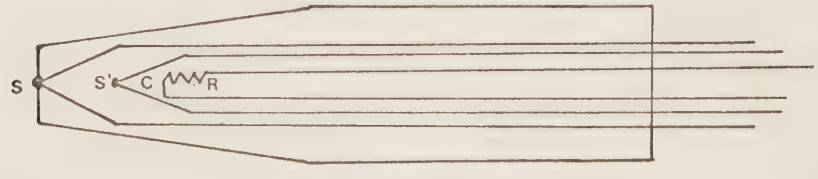


figure I.1.2a

Une région C du support isolant proche de S est régulée à une température fixe ou variable grâce à un système asservi commandant le dégagement de chaleur dans une résistance R logée dans C . Son signal d'entrée est fourni à partir d'un deuxième élément thermoélectrique S' (repérant θr), placé dans C .

- dispositifs de régulation de θr :

Les thermocouples utilisés,du type cuivre/constantan , ont un pouvoir thermoélectrique relatif de l'ordre de 40µV/°C .
La nécessité d'une régulation fine de θr à 1/20 °C près , implique de faire appel,pour l'entrée du système,à un amplificateur à bas niveau dont la dérive est inférieure à 1µV .
On dispose d'un ensemble FOXBORO*,couteux,relativement encombrant mais qui donne satisfaction . Il comprend un convertisseur tension-courant et un régulateur proprement dit à réglage P.I.D.

- enregistrement de θ et de θr : (figure I.1.2b)

Un enregistreur galvanométrique SEFRAM ,à double piste ,permet d'enregistrer simultanément :

. d'une part,les variations de θ (une tension réglable étant opposée à la tension issue du thermocouple de S)
. d'autre part,les variations de θr par utilisation du signal de sortie du convertisseur .

I.1.3. Comportement :

Le capteur peut s'utiliser selon deux modes différents tenants au rôle thermique de la région C de l'isolant .

. rôle de barrière thermique : (θr est maintenu à une valeur constante supérieure à celle θc de la peau)
Ce cas concerne l'exploration ponctuelle de région cutanée - par exemple - par contact de courte durée .
Dès que S entre en contact avec la peau, sa températu-

* Aimablement cédé par la Société Esso-Chimie

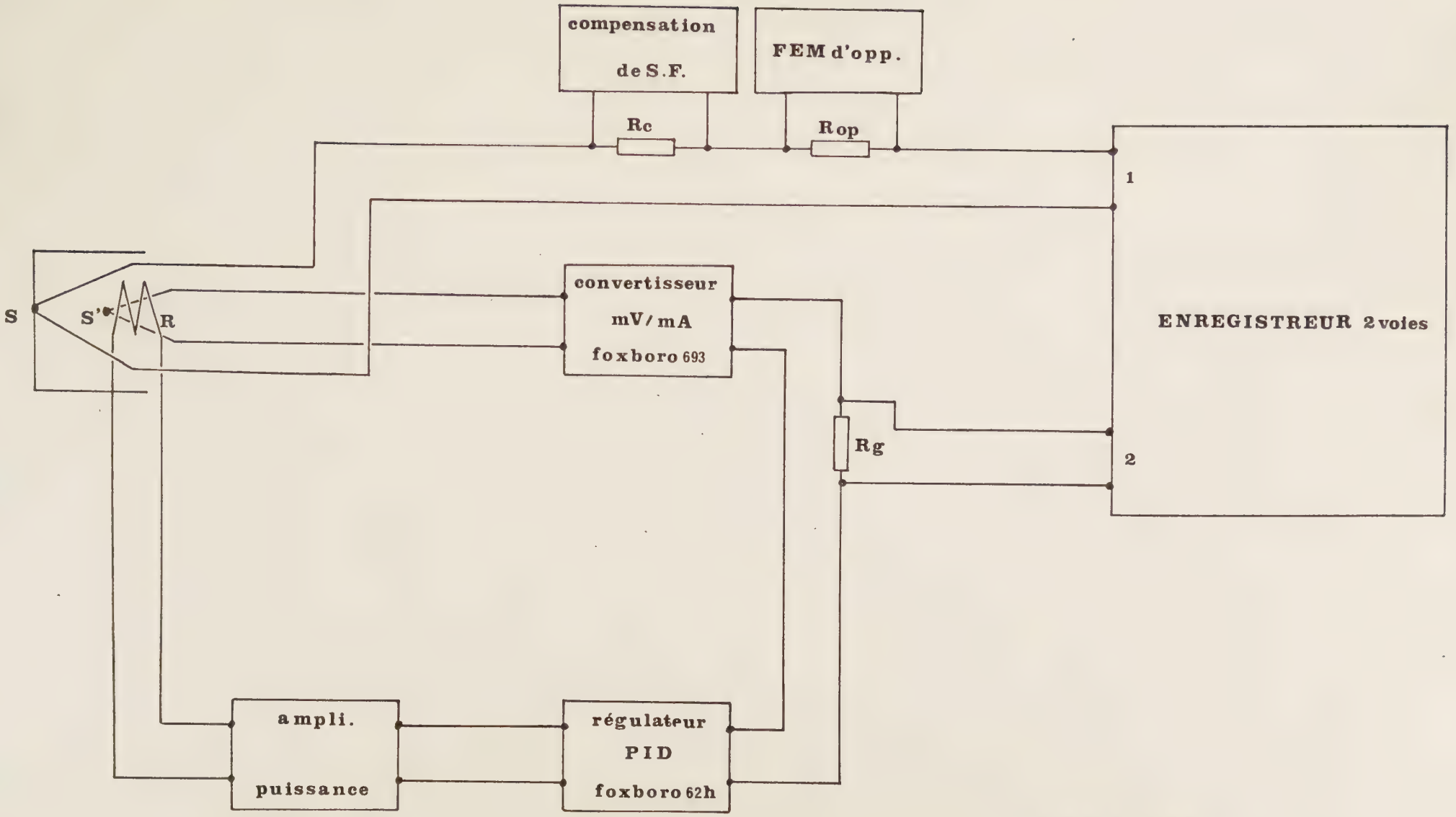

compensation
de S.F.
FEM d'opp.
Rc
Rop
1
S
S'
R
convertisseur
mV/mA
foxboro 693
ENREGISTREUR 2 voies
Rg
2
ampli.
puissance
régulateur
PID
foxboro 62h

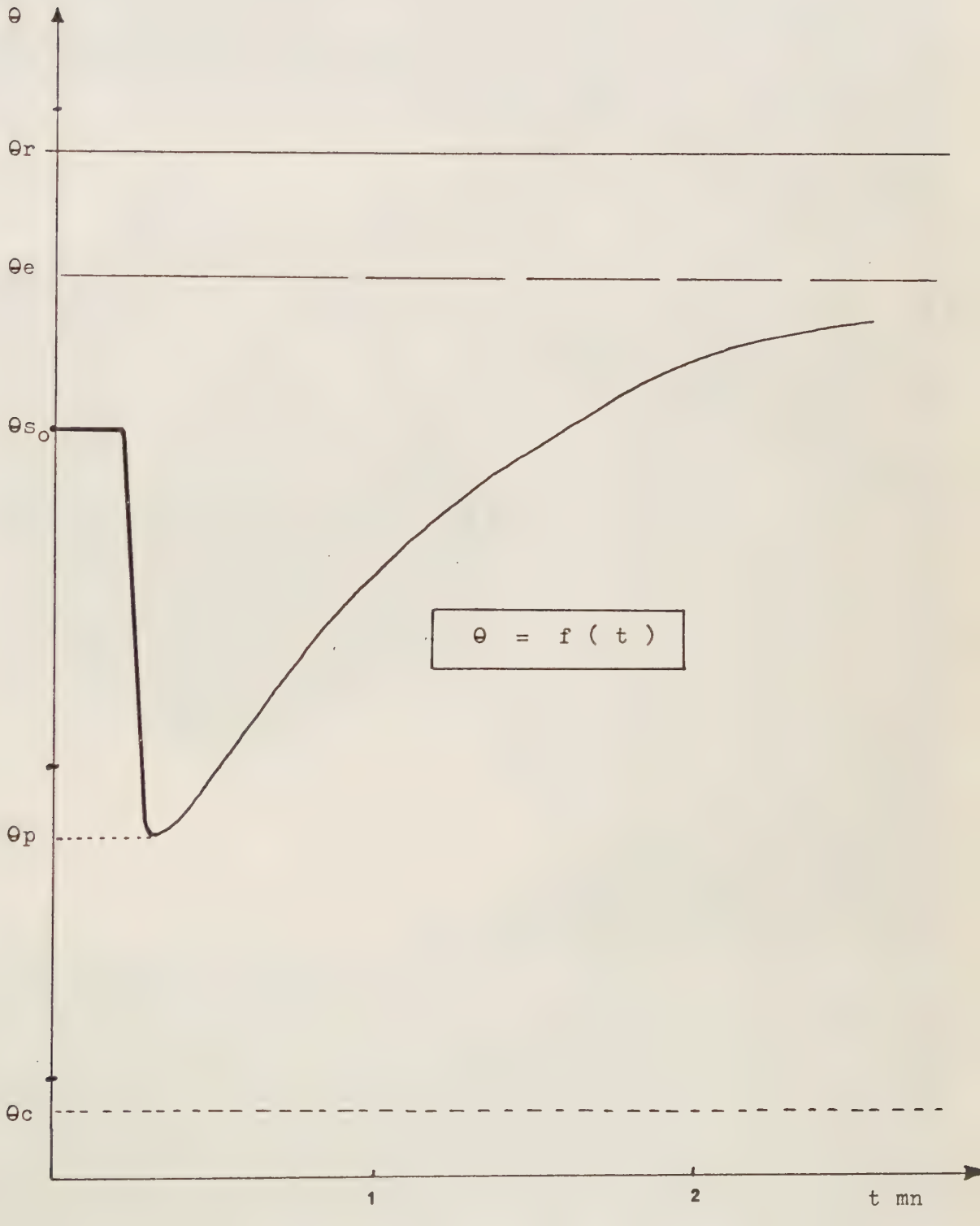
figure I.1.2b

re décroît rapidement (en 1,5 s) jusqu'à une valeur minimum θp (valeur de pic) et ensuite croît lentement jusqu'à une valeur d'équilibre θe . (figure I.1.2c)
La phase de diminution de θ correspond à un phénomène local d'effusivité,de cession de chaleur de la face de l'altuglas à la peau . * (13)
La phase d'augmentation de θ traduit l'établissement d'un régime global de transfert de chaleur entre la région C à la température θr et la région sous-cutanée (à la température θsc)
Le passage d'un mode à l'autre correspond au pic, dont la température θp,liée à θc (pour θr donné) d'une façon sûre et reproductible,est utilisée comme repère de mesure.
En fait, dès que le pic est atteint,on retire S de la peau jusqu'à ce que θ revienne à une température $\theta réf$ supérieure à θp ; S est de nouveau appliqué en un autre point puis retiré et ainsi de suite . Dix à vingt pointés par minute sont possibles .
Par exemple,en vue de diagnostics carotidiens , des zones ponctuelles symétriques par rapport au plan médian du corps sont alternativement explorées à droite et à gauche suivant plusieurs lignes frontales horizontales F1,F2,etc... (figure I.1.2d) . En effectuant une retranscription des courbes obtenues,en plaçant les valeurs de θp des points symétriques sur une même verticale, il est alors possible de mettre en évidence les moindres dissymétries .

Remarque : Une régulation de θr à une valeur inférieure à θc ne donnant pas de pic , la procédure est sans intéret (figure I.1.2.e.)

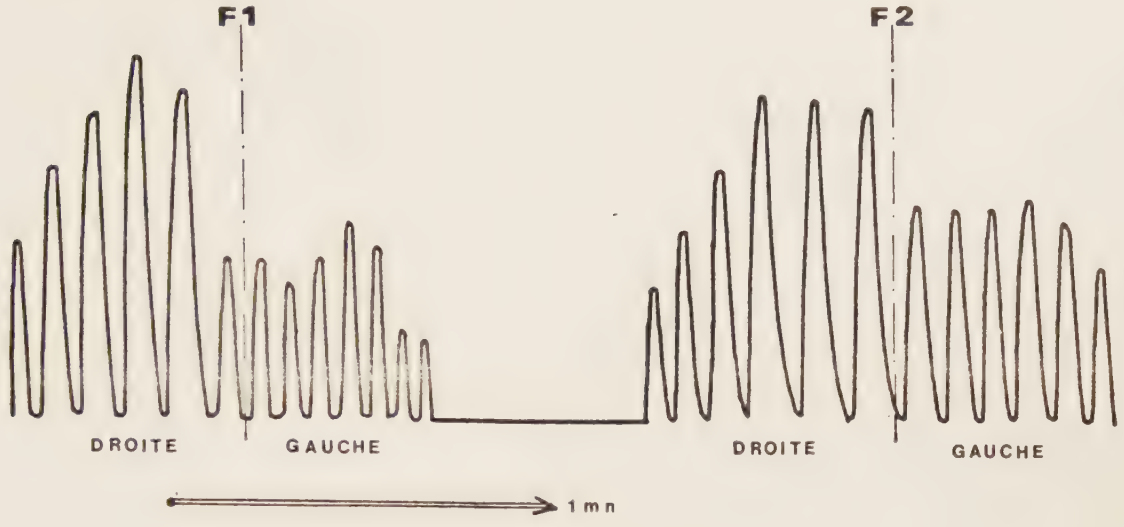
* Une étude de modèle mathématique de ce phénomène est en cours au Laboratoire des Echanges Thermiques de l'Université de Paris VI .

figure I.1.2c

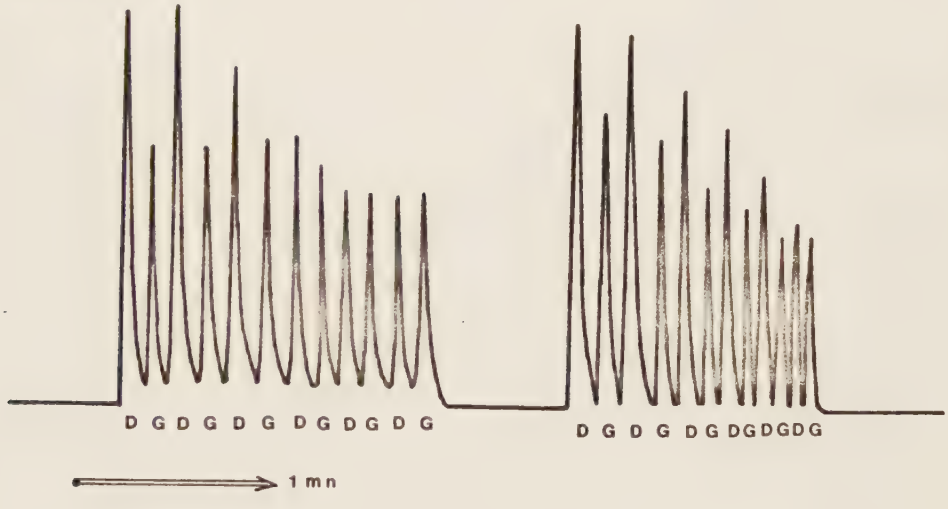


TECHNIQUE DE MESURE FRONTALE

Relevé A en ligne, de la droite vers la gauche



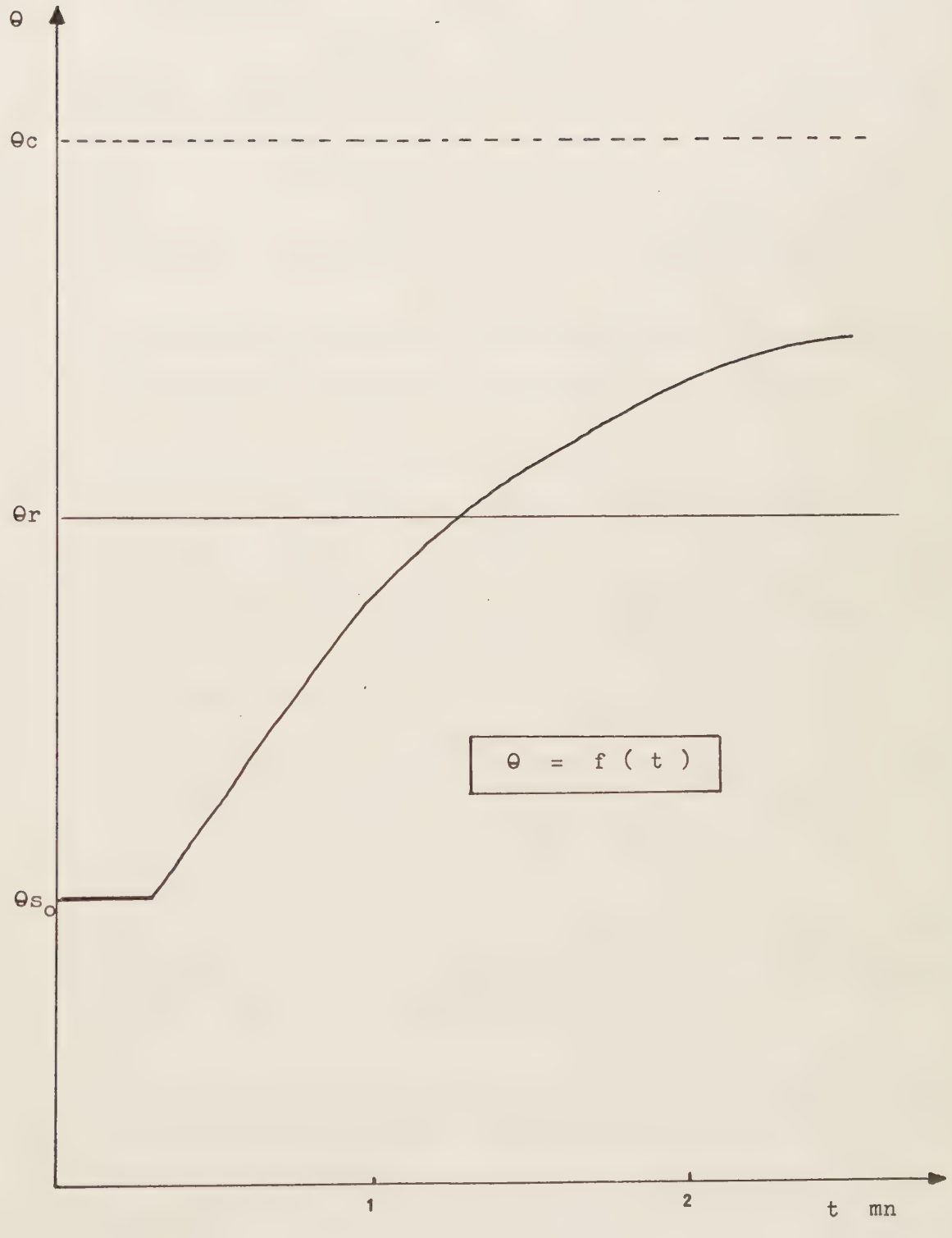
Relevé B alternativement point droit, point gauche



Retranscription M du relevé B; mise en évidence des dissymétries

figure I.1.2d

figure I.1.2e



- rôle d'adaptateur de température : (θr est asservi aux variations de θ)
Ce cas concerne l'évolution de θ par contact permanent pour un point cutané (au cours d'un traitement par exemple) .
Le signal de commande du régulateur étant dû à l'écart entre les tensions du thermocouple de mesure et celui de régulation, $|\theta r - \theta|$ est maintenu inférieur à ε ($\varepsilon = \frac{1}{10}$ °C) au cours de variations de θ .
Lors d'un contact prolongé de S avec la peau , le corps de sonde et la peau s'échauffent , θ et θr augmentent rapidement jusqu'à une valeur d'équilibre θe , voisine de θsc .

Le contact étant maintenu , on peut se rendre compte de l'effet d'un traitement par l'observation des variations de θe .

- conclusion : ce capteur , prototype que nous avons réalisé , au fonctionnement sûr , a permis depuis quatre ans , une expérimentation clinique précieuse d'anomalies neurologiques de nature carotidienne . Il a favorisé la compréhension des problèmes complexes et délicats de thermographie cutanée .
Il se caractérise par une sonde relativement volumineuse et un système régulateur compliqué et encombrant .
Par rapport au modèle initial, il a subi diverses améliorations technologiques ; en particulier, des dispositifs sonores de repérage automatique de θp et θref ont été installés , en relation avec le mouvement du stylet enregistreur .

Toutefois, des perfectionnements touchant à la sonde, au mode d'enregistrement, au processus de régulation et de repérage de θp et θref sont apparus nécessaires .

Il s'est agi d'aboutir à un appareil de faible encombrement, moins coûteux , maniable, commode d'emploi, donnant une réponse précise avec fidélité .
Tel a été l'objet de ce travail qui a porté sur l'étude et la réalisation d'un modèle nouveau qui corresponde aux objectifs envisagés .

I.2. NATURE DU TRAVAIL EFFECTUE

Les diverses étapes du travail ont concerné les rubriques suivantes:

- la sonde
- le système de régulation
- l'enregistrement
- le repérage de Θp et $\Theta réf$

I.2.1. La sonde :

Il s'est agi de construire une nouvelle sonde , en optimisant expérimentalement ses performances et en minimisant ses dimensions .
Nous avons utilisé,comme éléments thermo-sensibles,des thermistances en remplacement des thermocouples .

I.2.2. Système de régulation :

Compte tenu du comportement thermique de la sonde , nous avons étudié et mis en oeuvre un système unique régulateur de température permettant de faire fonctionner la sonde soit en "barrière thermique" , soit en"adaptateur de température" , ainsi que nous avons défini précédemment ces deux modes de fonctionnement .
En outre , nous nous sommes attachés à ce que ce servo-système soit:

- miniature
- performant
- commode à mettre en oeuvre
- peu coûteux

I.2.3. L'enregitrement :

L'enregitrement des mesures peut utiliser deux types d'appareillage :

- le premier,comportant un traceur XY,inscrit directement les repères thermiques Θp correspondant à chaque point cutané ;il suffit de relier ces repères pour obtenir le thermodiagramme.
  En cas de mesures de points symétriques, les repères de deux

points droit et gauche sont automatiquement inscrits sur la même verticale , avec des symboles différents .

- le second,simplifié,moins coûteux , utilisant un enregistreur sur papier donnant la courbe θ en fonction du temps . Ce système est utilisé préférentiellement lorsque le capteur fonctionne en " adaptateur de température " .

I.2.4. Repérages de θp et θréf :

Le système de détection de θp et θréf est indépendant du système d'enregistrement . Pour θp et θréf, les signaux sonores et lumineux sont différents .

CHAPITRE 2

II . S O N D E M I N I A T U R E

La simplification , l'amélioration , la miniaturisation de notre appareil de mesure , nous a conduit à fabriquer une sonde de faibles dimensions utilisant des thermistances microminiatures .
Outre la force électromotrice, fournie par un pont à thermistance, plus élevée que celle issue de thermocouples , l'utilisation de thermistances comme capteurs de température évite les circuits électroniques auxiliaires tels que la " compensation automatique de soudure froide " nécessaires lors de l'emploi de thermocouples .

II.1. LES THERMISTANCES :

Un rappel sur les thermistances est fait en annexe 1 , à la fin du chapitre , ainsi que l'énoncé des références et caractéristiques du type de thermistance choisi .

• Caractéristique résistance = f (température) :

Nous avons tracé deux courbes - figure II.1.3. -

- la courbe théorique
- " " pratique

1) la courbe théorique : d'après la caractéristique énoncée par le constructeur ($\frac{Ro(0)}{Ro(50)}$ = 5,7) et l'équation de la courbe (Ro(T)) nous avons calculé les points théoriques dans la plage de température qui nous intéresse , à savoir , de 26 à42°C .

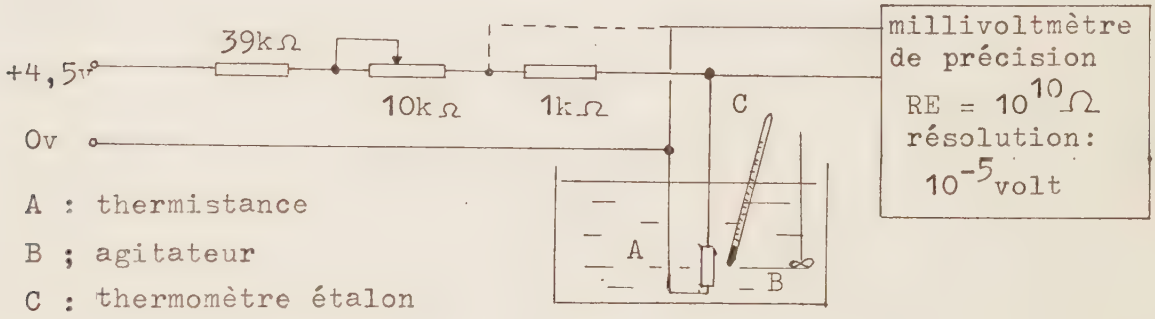
β = 3000

α = -0,028

T en °C	25	26	30	35	36	40	42
R en Ω	2000	1946	1692	1436	1388	1264	116

2) la courbe pratique : elle a été relevée en immergeant la sonde dans un bain à température variable de 25 à 43,5 °C .

Pour effectuer cette manipulation , nous avons réalisé le montage suivant :



A : thermistance

B ; agitateur

C : thermomètre étalon

La tension continue fixe de 4,5v alimente le circuit composé de :

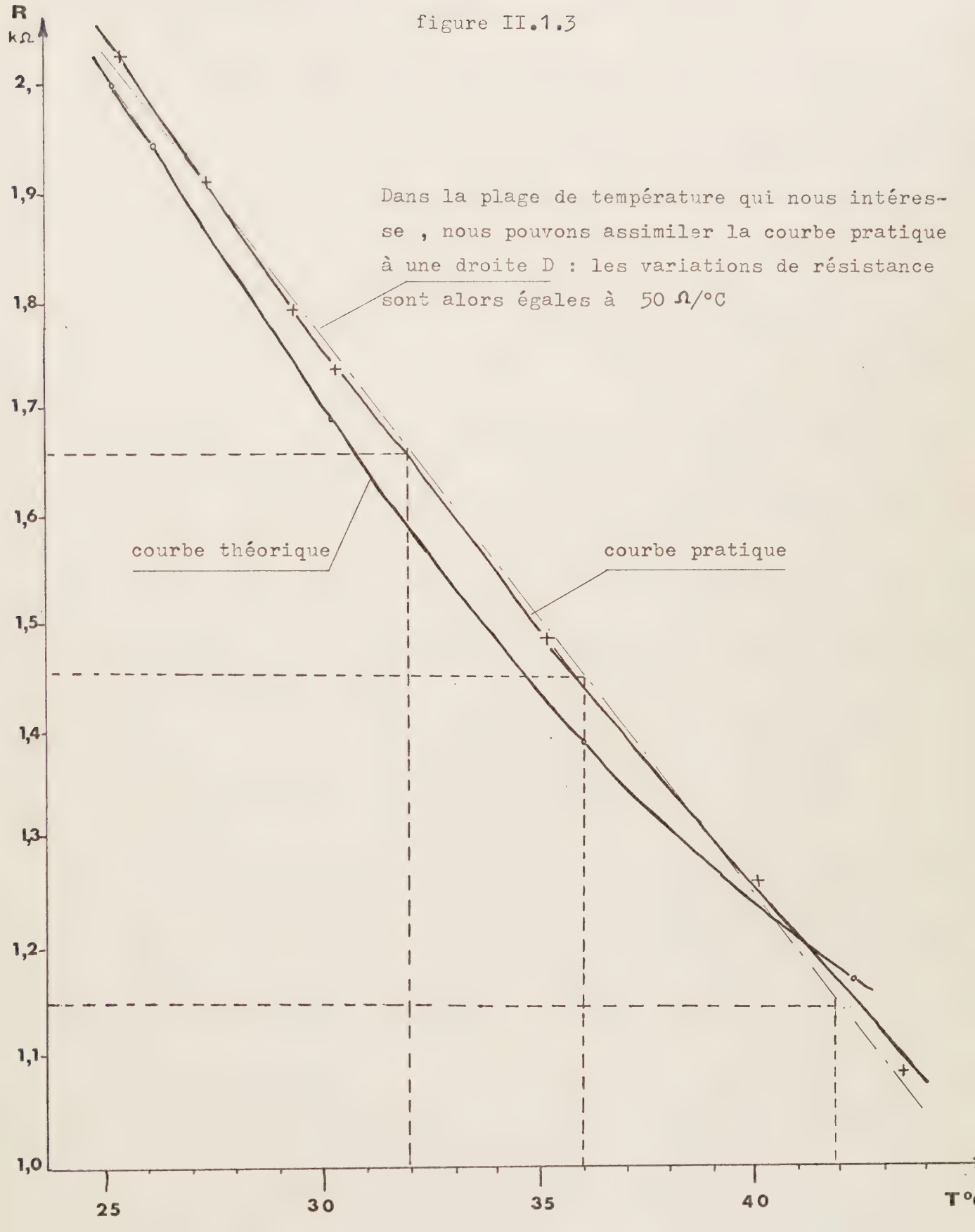
- une résistance chutrice de 39kΩ
- une résistance étalon de 1kΩ (0,1%)
- la thermistance à mesurer
- une résistance variable de 10kΩ permettant d'ajuster le courant à 0,1 mA - en affichant 100mV sur le millivoltmètre de précision branché aux bornes de 1k Ω -

Nous faisons varier la température du bain et nous lisons la tension aux bornes de la thermistance :

T en °C	25	27	29	30	35	37	40	43,5
U en mV	201,5	190,0	178,8	173,4	148,2	138,0	123,6	108,2
R en Ω	2015	1900	1788	1734	1482	1380	1236	1082

• • •

figure II.1.3


R
kΩ
2,
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,0
25
30
35
40
T°
Dans la plage de température qui nous intéresse , nous pouvons assimiler la courbe pratique à une droite D : les variations de résistance sont alors égales à 50 Ω/°C
courbe théorique
courbe pratique

II.2. DESCRIPTION DE LA SONDE : - figure II.2a -

Le corps de sonde C et son enveloppe protectrice E d'extrémité sont en altuglas .
Cette enveloppe est maintenue en position " repoussée " par un ressort R prenant appui sur le manche M solidaire du corps C .
La gaine souple G protège les fils de liaison avec l'appareillage .

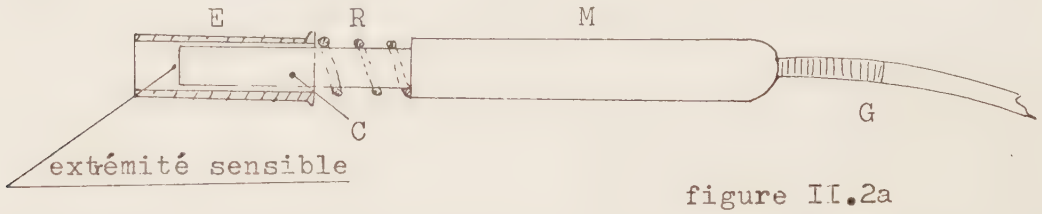


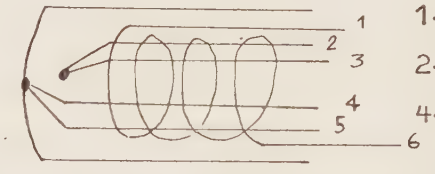
figure II.2a

Le schéma de détail de l'extrémité (figure II.2.b)nous indique la disposition :

- de la résistance chauffante bobinée directement sur les fils des thermistances après isolation
- des thermistances de mesure (THM) et de régulation (THR) distantes de 2,5 mm environ

La liaison avec l'appareillage est assurée par un cable 6 conducteurs de 2m de long .

figure II.2b



1-6 : résistance
2-3 : fils THR
4-5 : " THM

Utilisation : lors de l'application de la sonde sur la peau , l'enveloppe se rétracte sans effort et l'extrémité sensible entre en contact avec la peau . L'enveloppe , qui protège la sonde des perturbations extérieures , reprend sa position initiale dès que la sonde est retirée de la peau .

II.3. AVANTAGES :

Cette nouvelle sonde miniature présente des avantages par rapport à l'ancien modèle à thermocouples :

- temps de réponse amélioré et meilleure sensibilité
- réalisation plus simple (pas de soudures de thermocouple ni fils d'extension)
- simplification de l'appareillage (pas de compensation de soudure froide)
- production d'un signal de mesure plus élevé .

ANNEXE 1 : RAPPELS SUR LES THERMISTANCES

1.1. Rappels sur les semi-conducteurs :

La théorie électronique des solides montre que la conductivité électrique d'un isolant augmente quand sa température s'élève . Toutefois , cette augmentation est peu sensible et à la température ordinaire , la conductivité reste très faible , donc la résistivité ρ est très élevée , de l'ordre de 10^7 à $10^8 \Omega/cm^2/cm$.

Le phénomène contraire se produit avec les métaux : la conductivité de ceux-ci est très élevée par suite de la très forte concentration en électrons libres et cette conductivité décroit quand la température augmente . La résistivité ρ ,de l'ordre de 10^{-5} à $10^{-6} \Omega/cm^2/c$ croit avec la température .

Les semi-conducteurs sont des corps qui se situent , de par leur résistivité , qui s'échelonne à 0°C , de 10^{-2} à $10^9 \Omega/cm^2/cm$, entre les métaux et les isolants .

Comme les isolants , leur résistivité diminue quand la température s'élève , mais dans des proportions beaucoup plus fortes . On distigue les semi-conducteurs intrinsèques et les semi-conducteurs extrinsèques :

. . .

- semi-conducteurs intrinsèques : tels que le germanium , le silicium ; ils ne présentent pas de différence fondamentale de structure avec les isolants . Comme pour ces derniers , la conductivité est due au passage d'électrons , d'une bande de valence saturée à une bande de conduction vide , sous l'action de la température . Seuls ,les ordres de grandeur dans les intervalles séparant les bandes , diffèrent .

- semi-conducteurs extrinsèques : ce sont de vrais isolants rendus conducteurs par l addition d impuretés . Ils se divisent en deux catégories :

. ceux du type N (négatif) : dans lesquels un excès d électrons est apporté

. ceux du type P (positif) : dans lesquels un manque d électrons est créé .

1.2. Caractéristiques des thermistances :

Les thermistances sont aussi des semi-conducteurs et leur conductivité est de même nature que celle des semi-conducteurs extrinsèques, c est-à-dire qu elle est dûe à des impuretés introduites dans le réseau de certains cristaux . Elles sont obtenues en agglomérant des mélanges d oxydes de métaux tels que manganèse , nickel , cobalt, cuivre , fer et uranium .

Leur résistance électrique diminue avec une élévation de température , contrairement à ce qui se passe avec les métaux .

Les trois caractéristiques principales des thermistances sont :

. résistance = f (température)

. tension = f (")

. intensité = f (temps)

1.2.1. Caractéristique : résistance = f (température)

La résistance d une thermistance est uniquement fonction de sa température absolue . Puisque la puissance électrique dissipée dans une thermistance peut la chauffer et réduire sa résistance , il est nécessaire de mesurer cette résistance avec une puissance dissipée très faible . L expression de la résistance en fonction de la température est donné par la formule :

$$Ro\,(T) = Ro\,(To)\, e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{To}\right)}$$

. . .

Cette formule est valable pour une puissance dissipée nulle dans la thermistance .

Ro (T) : résistance à la température absolue T

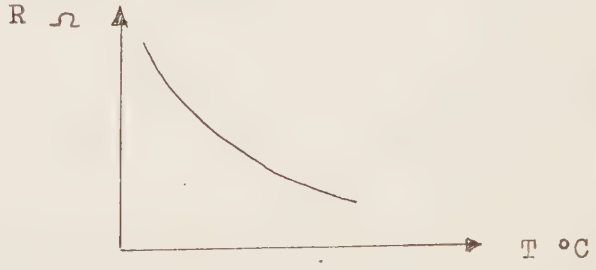
Ro (To): " " " " " To

β : constante dépendant du matériau utilisé pour fabriquer la thermistance . Les valeurs de β sont déterminées par des mesures faites de 0 à 50°C .

Le coefficient α de variation de résistance d'une thermistance en fonction de la température s'exprime par :

$$\alpha = \frac{1}{Ro} \cdot \frac{dRo}{dT}$$ ohm/ohm/°C , ce qui représente approximativement $-\frac{\beta}{T^2}$

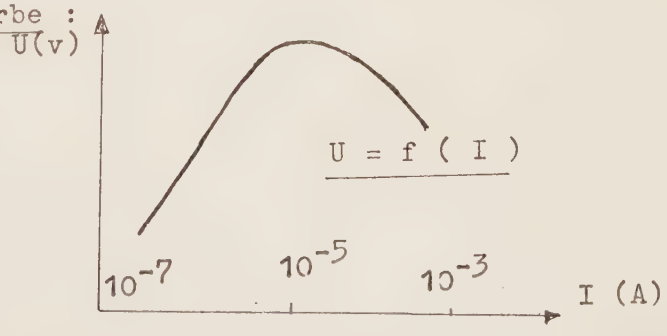
Allure de la courbe R = f (T)



1.2.2. Caractéristique tension = f (intensité) :

Une faible tension doit normalement être appliquée aux bornes des thermistances afin de limiter l'échauffement parasite . Il est intéressant de connaitre la relation qui lie l'intensité et la tension .

Allure de la courbe :



Dans la première partie de la courbe - à courant faible - la loi d'Ohm est applicable : $R = \frac{U}{I}$ = constante

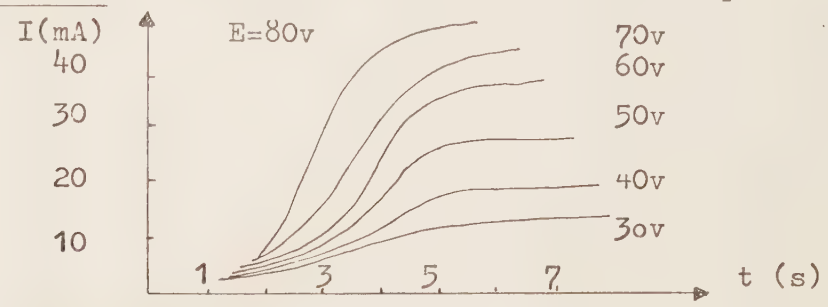
Si la tension augmente , la dissipation thermique croit , la résistance diminue , atteint une valeur de crête puis devient négative

. . .

1.2.3. Caractéristique intensité = f (temps) :

Le temps nécessaire pour chauffer une thermistance à sa valeur maximum est fonction de sa masse et de la tension appliquée à ses bornes . En effet , lors de la mise sous tension , un courant circule , chauffe la thermistance qui voit sa résistance diminuer , le courant augmente donc et chauffe davantage la thermistance .... etc , jusqu à ce que la thermistance atteigne la température maximum possible pour la puissance disponible dans le circuit , ce qui détermine un temps minimum de stabilité .

Allure de la courbe : (exemple avec une thermistance puissante)



1.3. Choix des thermistances :

Raisons du choix : le choix a été fait en fonction de :

- la sensibilité
- la précision
- la stabilité dans le temps
- la constante de temps réduite
- l'interchangeabilité

Références et caractéristiques : les thermistances sont du type perl

- constructeur : FENWAL
- référence : GC 32 L4
- ø perle : 0,35 mm
- ø fils de liaison : 0,02 mm
- longueur des fils : 9,50 mm
- résistance à 25°C : 2000 Ω
- précision : 1%
- constante de dissipation (1) : 0,1 mW
- valeur de $\frac{R(0°C)}{R(50°C)}$: 5,7
- constante de temps: 1 seconde (2)

(1): valeur de la puissance qui élève T°C de 1°C au dessus de l'ambiance .

(2): temps necessaire pour que T varie de 63% de l'écart entre la température initiale et celle où elle soumise brusquement .

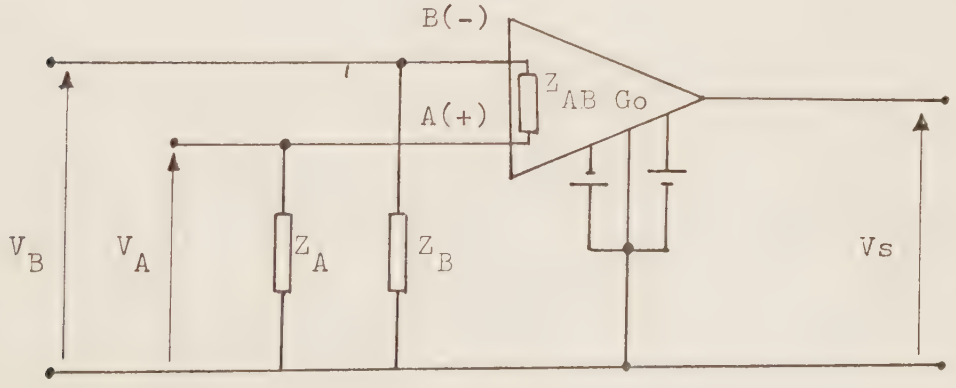
. . .

CHAPITRE 3

ANNEXE 2

2. Les amplificateurs opérationnels :

2.1. Généralités : le schéma fonctionnel d'un amplificateur opérationnel en boucle ouverte est représenté par la figure suivante :



. . .

A : entrée + , la polarité du signal est la même en sortie

B : entrée - , " " " " " inverse " "

Z_A , Z_B : impédances d entrée en mode commun

Z_{AB} : impédance d entrée différentielle

Go : gain enboucle ouverte

Vs : tension de sortie

$V_A - V_B$: " " décalage

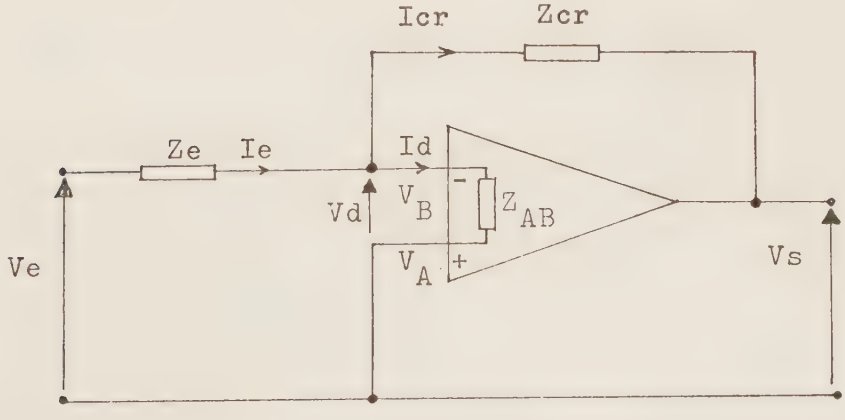
Nous disposons de deux entrées + et - permettant d obtenir respectivement une tension en sortie en phase ou en opposition de phase par rapport au signal appliqué à l entrée .

Les amplificateurs opérationnels sont caractérisés par :

- une tension continue pratiquement nulle entre les entrées
- un gain en boucle ouverte très élevé
- une impédance d entrée élevée
- une impédance de sortie faible
- une large bande passante en fréquence
- une faible dérive en fonction du temps et de la température

En pratique , les amplificateurs opérationnels sont associés à des circuits de contre-réaction ; ils fonctionnent alors en boucle fermée . Ce bouclage permet de contrôler précisément les performances de l ensemble (impédances d'entrée , de sortie , gain,etc) Les éléments de la chaîne de contre-réaction peuvent être très divers (résistances , diodes , réseaux complexes , etc ...) , permettant ainsi de réaliser différentes fonctions telles que : inversion , adaptation d'impédance , intégration , différentiation , etc ...

2.2. Gain en boucle fermée :



. . .

Supposons l'amplificateur idéal et que , par suite , Z_{AB} et Go soient infinis . Dans ces conditions , la tension d'erreur $Vd = V_A - V_B$ tend vers zéro ; or, $V_A = 0$, ce qui entraine $V_B = 0$, ce qui revient à dire que le courant d'erreur Id est nul ,

Id = 0 entraine Ie = - Icr , d'où la relation :

$$\frac{Ve - V_B}{Ze} = \frac{V_B - Vs}{Zcr}$$

$V_B = 0$, donc :

$$G = \frac{Vs}{Ve} = - \frac{Zcr}{Ze}$$ avec G , le gain en boucle fermée .

En pratique,lorsque nous faisons l'étude d'un circuit, l'amplificateur est choisi tel que :

- la tension d'erreur Vd soit négligeable devant la tension de calcul Ve
- le courant d'erreur Id " " " le courant de calcul Ie

Le gain en tension en boucle fermée est donné par la relation :

$$G = - \frac{Zcr}{Ze}$$

En réalité , Z_{AB} et Go ont une valeur finie , et le gain G en boucle fermée est donné par la relation :

$$G = - \frac{Zcr}{Ze} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{Go}\left(1 + \frac{Zcr}{Ze} + \frac{Zcr}{Z_{AB}} \right)}$$ d'où nous

pouvons faire apparaitre l'expression du gain de bruit :

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{Zcr}{Ze} + \frac{Zcr}{Z_{AB}}$$

III. DISPOSITIF DE REGULATION

INTRODUCTION

Pratiquement , lors de l'emploi de la sonde , θr est concerné par une gamme de température comprise entre 20°C (température ambiante) et 40°C .

Un régime permanent s'observe lorsque se maintiennent constantes:

- la puissance chauffante fournie à la région interne de la sonde
- la température θr

Il a lieu lorsque la sonde fonctionne en adaptateur ou en barrière , à la suite d'un contact prolongé avec la peau (le comportement physiologique du patient étant invariant) ou d'un séjour à l'air libre en l'absence de pratique opératoire (les conditions ambiantes demeurant invariables) .

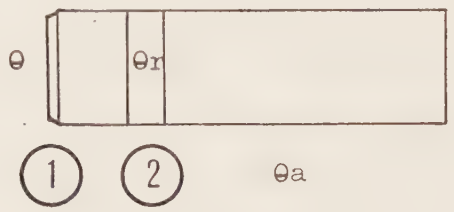
Par contre , dans des conditions changeantes d'environnement (ce qui est le cas lors d'exploration thermographique) la puissance chauffante doit se moduler au gré des perturbations thermiques extérieures pour maintenir soit θr constant (fonctionnement en barrière thermique) , soit $\theta - \theta r$ nul (fonctionnement en adaptateur) à εo près ($\varepsilon o \approx 1/20°C$)

En vue de déterminer le type de fonctionnement du servomécanisme qui réponde à ces exigences , il est fait , tout d'abord , une étude sur le comportement thermique de la sonde .

III.1. COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA SONDE

III.1.1. Modèle thermique :

Compte tenu de la description donnée de la sonde à thermistances, le modèle suivant rend assez bien l'état des puissances mises en jeu . On considère deux zones distinctes (figure III.1.1.)



1- la zone extrémale, caractérisée par une capacité thermique C_1 , un coefficient d'échange avec le milieu ambiant h_1 et la température de mesure θ

2- la zone interne, caractérisée de façon analogue par C_2,h_2 et θr

De plus, h' est relatif au couplage thermique des deux zones .
pe et pr sont les puissances thermiques fournies respectivement:

- d'une part ,par l'extérieur à la face plane de la zone extrémale
- d'autre part,par le régulateur à la zone interne

III.1.2. Equations thermiques :

Pour chacune des zones, la puissance reçue est utilisée à la variation de sa température et aux transferts thermiques avec le voisinage (l'autre zone et le milieu ambiant) .
Nous écrivons donc, θa étant la température ambiante :

$$pe = C_1 \frac{d\theta}{dt} + h' (\theta - \theta r) + h_1 (\theta - \theta a)$$

$$pr = C_2 \frac{d\theta r}{dt} + h' (\theta r - \theta) + h_2 (\theta r - \theta a)$$

Le comportement thermométrique de la sonde s'exprime par θ et θr . On en obtient une formulation simple en utilisant les transformées de Laplace relatives aux variations de grandeurs ayant lieu à partir de régimes permanents .
L'on a ainsi :

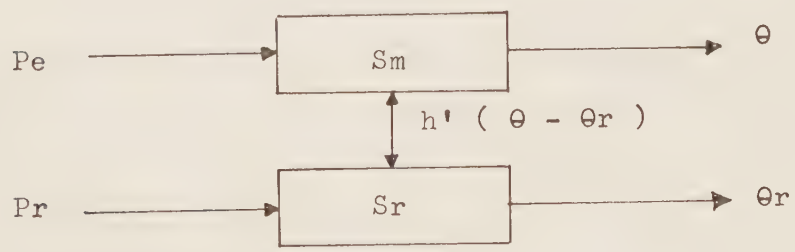
$$Pe = (p C_1 + h' + h_1) \theta - h' \theta r$$

$$Pr = (p C_2 + h' + h_2) \theta r - h' \theta$$

Posant : $a_1 = pC_1 + h' + h_1$, $a_2 = pC_2 + h' + h_2$ et $D = a_1 a_2 - h'^2$
il vient :

$\theta = \frac{a_2}{D} \cdot Pe + \frac{h'}{D} \cdot Pr$
$\theta r = \frac{h'}{D} \cdot Pe + \frac{a_1}{D} \cdot Pr$

III.1.3. Diagramme fonctionnel de la sonde :
Il est représenté par la figure suivante :



Il traduit symboliquement les fonctions de transfert qui sont du deuxième ordre

III.1.4. Détermination expérimentale des coefficients relatifs aux fonctions de transfert :

En régime permanent , nous pouvons écrire :

$$\Theta = \frac{a_2'}{D'} \cdot Pe + \frac{h'}{D'} Pr$$

$$\Theta r = \frac{h'}{D'} Pe + \frac{a_1'}{D'} Pr$$

avec $a_1' = h' + h_1$, $a_2' = h' + h_2$ et $D' = (h'+h_1)(h'+h2) - h'^2$

Le relevé expérimental (figure III.1.4a) de Θr et Θ en fonction de Pr permet de déterminer ces coefficients :

$$a_1' / D' = 80$$

$$a_2' / D' = 71$$

$$h' / D' = 64$$

En régime transitoire , nous pouvons appliquer les équations thermiques :

$$(1) \quad \begin{aligned} pe &= C_1 \frac{d\Theta}{dt} + h'(\Theta - \Theta r) + h_1 (\Theta - \Theta a) \\ pr &= C_2 \frac{d\Theta r}{dt} + h'(\Theta r - \Theta) + h_2 (\Theta r - \Theta a) \end{aligned}$$

au relevé expérimental (figure III.1.4b) de Θ et Θr en fonction du temps t , après une variation ΔPr de puissance ($\Delta Pr = 25.10^{-3} W$) . En remplaçant dans (1) , nous pouvons calculer C_1 , C_2 , h_1 , h_2 , h' :

$C_1 \approx 0{,}030$ $\qquad$ $h_1 \approx 1{,}1\ 10^{-3}$ $\qquad$ $h' \approx 4{,}1\ 10^{-3}$

$C_2 \approx 0{,}400$ $\qquad$ $h_2 \approx 0{,}4\ 10^{-3}$

Nous pouvons écrire : $a_1 = (30\ p + 5{,}5)\ 10^{-3}$

$a_2 = (400p + 4{,}5)\ 10^{-3}$

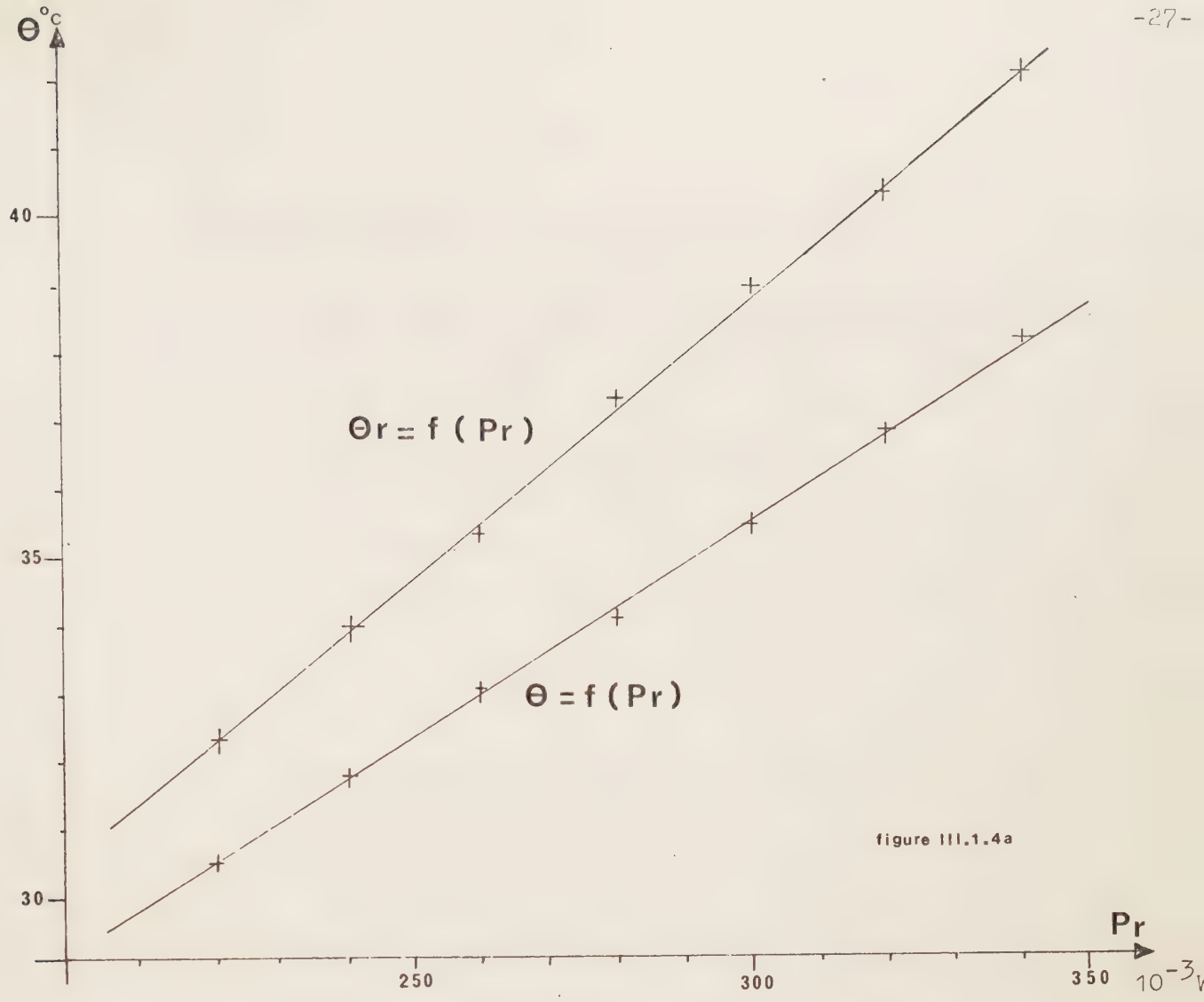


figure III.1.4a

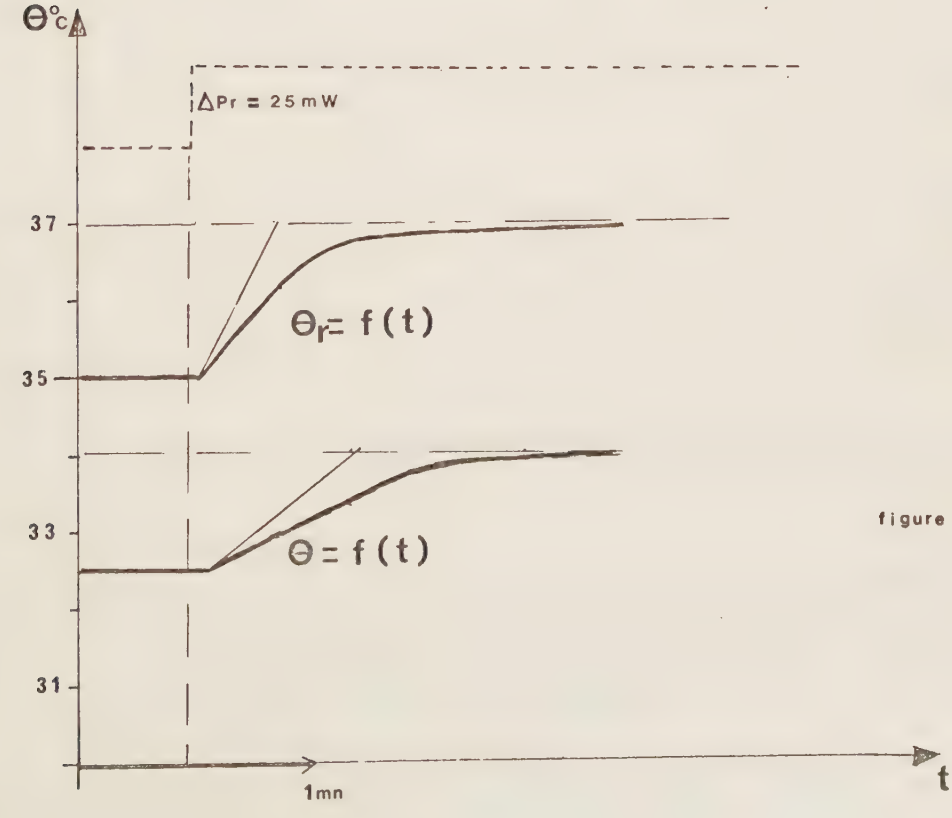


figure III.1.4b

III.2. ETUDE THEORIQUE DU SERVO-SYSTEME : (21)

III.2.1. Expression de l'écart $\mathcal{E}$ de commande du servo-régulateur:

La commande du servo-régulateur se fait par une grandeur d'écart $\mathcal{E}$ dont l'expression dépend du type de fonctionnement pratiqué :

- cas de l'isolant : barrière thermique

θr fluctue autour d'une valeur θo constante, réglable, que l'on se fixe supérieure à θc

d'où $\mathcal{E}' = \theta o - \theta r$

et $\mathcal{E}'(p) = \theta o_{(p)} - \left(\frac{h'}{D} Pe + \frac{a_1}{D} Pr \right)$

- cas de l'isolant : adaptateur thermique

θr s'ajuste aux variations de θ

d'où $\mathcal{E}' = \theta - \theta r$

et $\mathcal{E}'_{(p)} = \frac{a_2 - h'}{D} Pe + \frac{(h' - a_1)}{D} Pr$

Dans les deux cas, le rôle du servo-régulateur est de pourvoir à une puissance Pr compensant les variations de Pe pour maintenir $|\mathcal{E}| \leq \mathcal{E}'_o$, ($\mathcal{E}'_o \approx \frac{1}{20}$ °C) au cours d'une exploration thermographique.

Physiquement, les détecteurs d'écart dont on dispose sont des ponts résistifs dans lesquels sont incluses les thermistances (voir plus loin) . Ils fournissent une tension $\mathcal{E}$ proportionnelle à $\mathcal{E}'$ ($\mathcal{E} = k \mathcal{E}'$) qui constitue le signal d'entrée du régulateur .

III.2.2. Equations et diagrammes fonctionnels du servo-système complet: (21,22)

Le régulateur est un amplificateur de tension et de puissance muni de réglages compensateurs adéquats dont la fonction de transfert est $R_{(p)}$. La puissance qu'il fournit s'exprime alors par :

$$Pr_{(p)} = R_{(p)} \cdot \mathcal{E}_{(p)}$$

Ainsi,peut-on donner pour chacun des cas de fonctionnement considérés,en utilisant les expressions précédentes : d'une part, la réponse $\mathcal{E}'_{(p)}$ à une entrée $Pe_{(p)}$; d'autre part, le diagramme fonctionnel qui la symbolise .

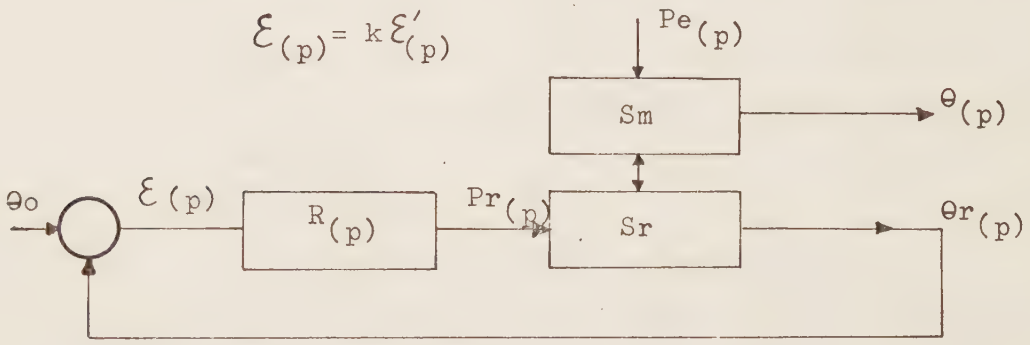
- cas de l'isolant : barrière thermique

Portant Pr dans les équations du paragraphe précédent , il vient :

$$\mathcal{E}'_{(p)} = \theta o_{(p)} - \left(\frac{h'}{D} Pe_{(p)} + \frac{a1}{D} \cdot R_{(p)} \mathcal{E}'_{(p)} k \right)$$

$$\boxed{\mathcal{E}'_{(p)} = \left(\frac{\theta o_{(p)}}{1+\frac{a1}{D} k R_{(p)}} - \frac{\frac{h'}{D}}{1+\frac{a1}{D} k R_{(p)}} \cdot Pe_{(p)} \right)}$$

$$\mathcal{E}_{(p)} = k \mathcal{E}'_{(p)}$$

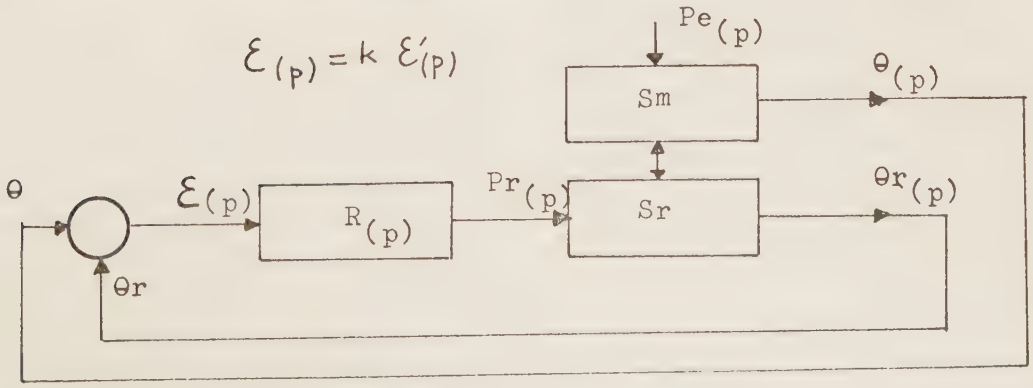


- cas de l'isolant ; adaptateur thermique

Procédant pareillement, on obtient :

$$\boxed{\mathcal{E}'_{(p)} = \left(\frac{(a2-h')/D}{1+(a_1-h')R_{(p)}k/D} \cdot Pe_{(p)} \right)}$$

$$\mathcal{E}_{(p)} = k\, \mathcal{E}'_{(p)}$$



III.2.3. Conception du régulateur : (21,22)

La fonction de transfert du régulateur , qui peut être pourvue de termes d'intégration , de proportionnalité et de dérivation, a pour expression générale :

$$R_{(p)} = \left(\frac{a}{p} + b + Cp \right) ko$$

En fonction des caractéristiques que l'on souhaite obtenir pour $\mathcal{E}'$, en réponse à diverses formes de perturbations , il s'agit de cerner les rôles de ces termes . ko est un terme multiplicateur fourni par un préamplificateur et un ampli de puissance .

III.2.3.1. Rôle de $\frac{a}{p}$:

Ce terme intégral conditionne l'écart $\mathcal{E}'_{(t)}$, pour les régimes d'équilibre puisque la limite $\mathcal{E}'_{(t\to\infty)}$ est celle de $p\,\mathcal{E}'_{(p)}$ pour $p = 0$. Il s'ensuit que sa présence est nécessaire car :

- d'une part , il permet une erreur de position nulle $\mathcal{E}'_{(t\to\infty)} = 0$ pour des régimes permanents définis dans l'introduction , s'établissant à la suite d'une variation d'échelon de Θo ou de Pe

- d'autre part , il fixe , par la valeur de a , l'erreur de trainage $\mathcal{E}'o$ qui apparait lorsque la sonde , fonctionnant en adaptateur , est appliquée sur la peau par contact prolongé et qu'une perturbation physiologique donne lieu à des variations lentes de Pe sensiblement linéaires (lors de traitement ou de garrottage)

$$pe_{(t)} = po \cdot t \quad \text{et} \quad Pe = \frac{po}{p2}$$

$$p\,\mathcal{E}'_{(p)} = \frac{(a_2 - h')/D}{1 + (a_1 - h')k\,Rp/D} \cdot \frac{po}{p2} \cdot p$$

quand $p \to 0$, nous avons $\mathcal{E}'o = \frac{h_2}{h_1 . k . ako} \cdot po$

III.2.3.2. Rôle de b :

Ce terme proportionnel intervient pour une large part lorsque la sonde , fonctionnant en barrière thermique , est appliquée périodiquement , à la fréquence f , sur la peau par contacts courts .
Globalement , les variations de θ évoluent sinusoïdalement entre les valeurs θp et $\theta réf$

$$p = j\omega \text{ avec } \omega = 2\pi f$$

$$\theta = \theta m \cos \omega t$$

Pratiquement, l'amplitude θm des variations de θ est au moins de 0,5 °C et celle $\mathcal{E}'m$ de $\mathcal{E}'_t$ doit être inférieure à 1/20 °C . Il advient donc, pour les valeurs complexes des grandeurs de puissance et de température :

$$Pe = a_1 . \theta m . e^{j\omega t} \quad \text{et} \quad \theta r = \frac{Pr}{a_2} + \frac{h'}{a_2} \theta m e^{j\omega t}$$

$$\text{or } Pr = k.R_{(j\omega)} \cdot \mathcal{E}'_{(j\omega)}$$

$$\text{d'où } \mathcal{E}'_{(j\omega)} = \frac{-h'/a_2}{1 + k_o k\, R/a_2} \theta m . e^{j\omega t}$$

1 pouvant être négligé devant $k_o k\, R/a_2$, il s'ensuit que :

$$\mathcal{E}'_{(j\omega)} = \frac{-h'\ \theta m\ e^{j\omega t}}{k_o k(\frac{a}{j\omega} + b)} = \mathcal{E}'m \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega t}$$

avec :

$$\mathcal{E}'m = \frac{h'}{k_o k \sqrt{\frac{a^2}{\omega^2} + b^2}} \theta m$$

A la fréquence de 1/3 de hertz environ , à laquelle on opère, $\frac{a^2}{\omega 2}$ peut être faible devant b^2 , ce qui marque l'importance de b pour l'obtention de $\mathcal{E}'m$ inférieur à $\mathcal{E}o$ (1/20 °C)

III.2.3.3. Rôle de Cp :

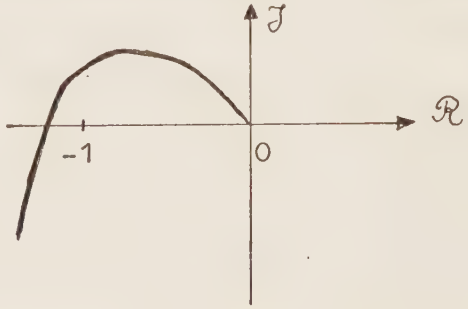
Ce terme " dérivée " contribue à assurer,au servo-système , stabilité et amortissement satisfaisants ; en effet , pour les deux cas de finctionnement (barrière thermique et adaptateur) les fonctions de transfert en boucle ouverte sont données respectivement par :

$$\frac{a_1}{D} \cdot k \cdot R_{(p)} \quad \text{et} \quad \frac{a_1-h'}{D} \cdot k \cdot R_{(p)} \text{ , assimi-}$$

lables d'ailleurs à une même expression $K\,G_{(p)}$ puisque globalement a_1-h' et a_1 sont du même ordre de grandeur .

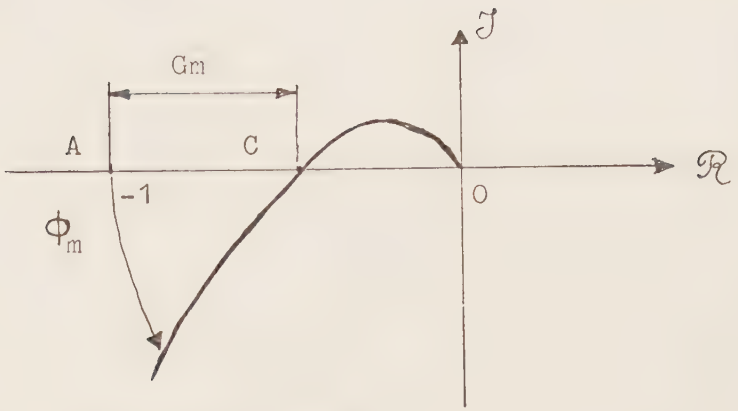
$$K\,G_{(p)} = K \left(\frac{1+\alpha p+\beta p^2+ \ldots}{1+\alpha' p+\beta' p^2+ \ldots} \right)$$

Dans ces conditions , la courbe de Nyquist , graphe de $K\,G_{(j\omega)}$ dans le plan complexe des axes $\mathcal{R}_{(j\omega)}$ et $\mathcal{J}_{(j\omega)}$ concerne les deux cas de fonctionnement .
Les valeurs imposées à a pour satisfaire aux conditions précédentes de précision , influant directement sur K , peuvent amener la courbe de Nyquist à gauche du point critique (-1,0),rendant le système instable du fait du pompage (figure III.2.3.3a)



Pour éviter cette éventualité , il y a lieu de pratiquer une avance de phase exprimée par le terme Cp .
D'ailleurs , on la définit de façon à donner à la courbe de Nyquist une marge de gain de 10 dB et une marge de phase de 45° vis à vis du point critique (figure III.2.3.3b)

figure III.2.3.3b



$$Gm = 20 \log \frac{OA}{OC}$$

Il en résulte ainsi pour $\mathcal{E}'_t$, lors de toute variation d'échelon de Θo ou de pe , un régime transitoire court et bien amorti qui assure une utilisation commode de l'appareil .

Conclusion :

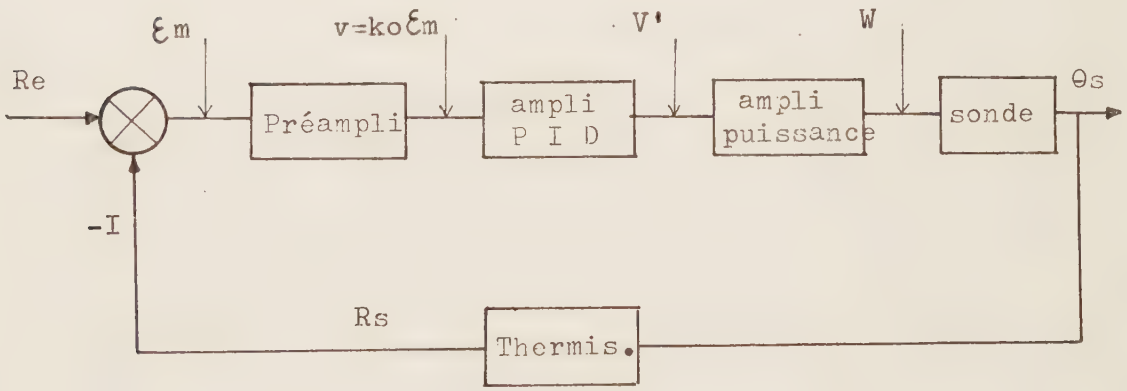
Ainsi , par le jeu des termes $\frac{a}{b}$, b , Cp , dans la fonction $R_{(p)}$ il apparait possible de vaincre le dilemme précision - stabilité qui se pose dans le présent problème .

Un ensemble d'éléments résistifs et capacitifs judicieusement associés , inséré entre l'entrée et la sortie d'un amplificateur opérationnel , doit remplir les fonctions précédemment décrites .

III . 3 . REALISATION DU REGULATEUR :

III.3.1. Choix des éléments constitutifs :

Le repérage de la température est réalisé à l'aide d'une thermistance insérée dans une des branches d'un pont de Wheatstone qui constitue le détecteur d'écart . Ce détecteur convertit la différence entre la résistance de la thermistance et la la résistance d'affichage de la température en une différence de potentiel . Il convient ensuite d'amplifier cette tension à l'aide d'un amplificateur à très faible dérive , ce qui permet d'alimenter le pont avec une tension continue . Les actions proportionnelle,intégrale et dérivée sont associées , par des circuits R-C , à un deuxième étage amplificateur dont la sortie commande un étage de puissance à transistor fournissant l'énergie à la sonde par effet Joule .

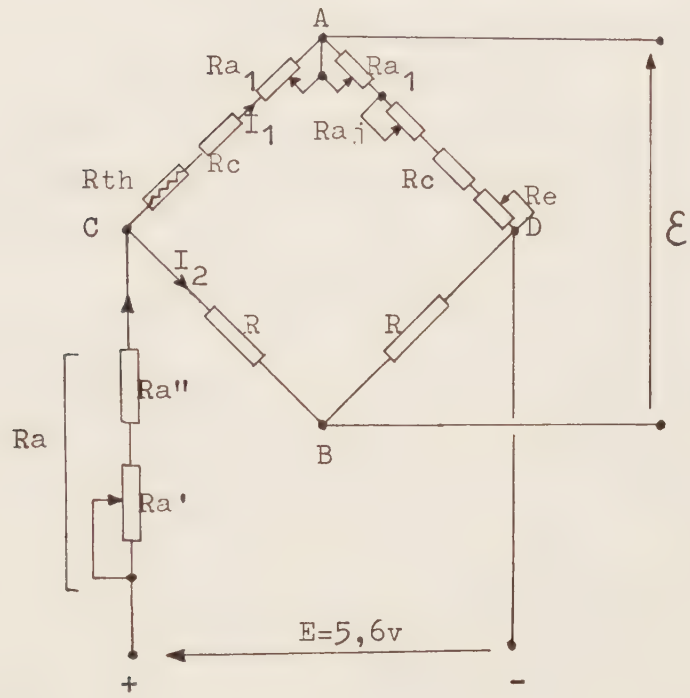


III.3.2. Les amplificateurs opérationnels :

Un rappel est fait en annexe 2 , au début du chapitre III , concernant les généralités .

III.3.3. Production du signal de mesure :

III.3.3.1. Détecteur d'écart : c'est un pont de Wheatstone représenté par la figure suivante :



$\mathcal{E}$ ($\mathcal{E}$ représente 2,5mV/°C

Rth : thermistance
FENWAL type GC 32 L4

Détermination des éléments :

Le courant circulant (I_1) dans la thermistance - de résistance 2000Ω à 25°C - doit être très faible (< 0,I mA), de plus, rester à peu près constant pour obtenir une linéarité correcte ; les variations de résistance de la branche AC du pont , comme pour la branche AD , sont de 500Ω (pour une étendue de 10°C), donc la résistance totale de la branche doit être supérieure à 10 fois 500Ω(Rc = 5600Ω) . Les deux branches AD et AC sont équilibrées par Ra_1 (100Ω) .

Le zéro de l'étendue est ajusté par Raj (= 2200Ω) ; pour 32°C , Raj = 1650Ω.

Re est un potentiomètre 10 tours (500Ω) de commande de consigne (32 à 42°C) . Il est choisi en fonction des caractéristiques de la thermistance (50Ω/°C) et de l'étendue désirée .

Le courant I_2 est beaucoup plus grand que I_1 - les branches CB et BD ont une faible impédance (R = 100Ω, 0,1% haute stabilité) donc la tension V_{CD} reste fixe pratiquement .

V_{CD} est ajustée avec Ra (Ra' = 220Ω et Ra" = 470Ω) - V_{CD}= 1,460v

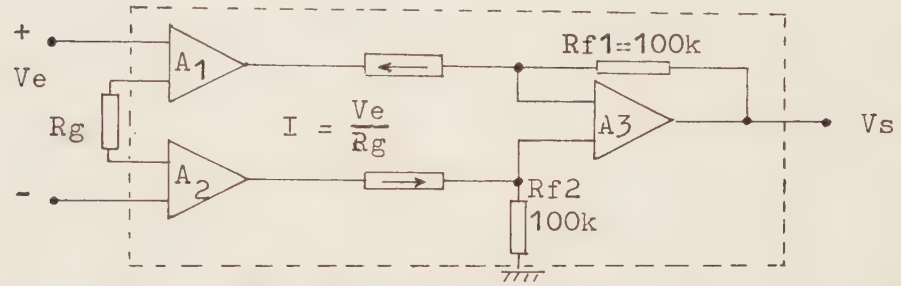
III.3.3.2. Préamplificateur :

Ce préamplificateur permet de fournir un signal d'écart $k_o\varepsilon$ pouvant alimenter :

- l'entrée de l'étage régulateur prèprement dit
- un galvanomètre à zéro point milieu dont la déviation est proportionnelle à ε .

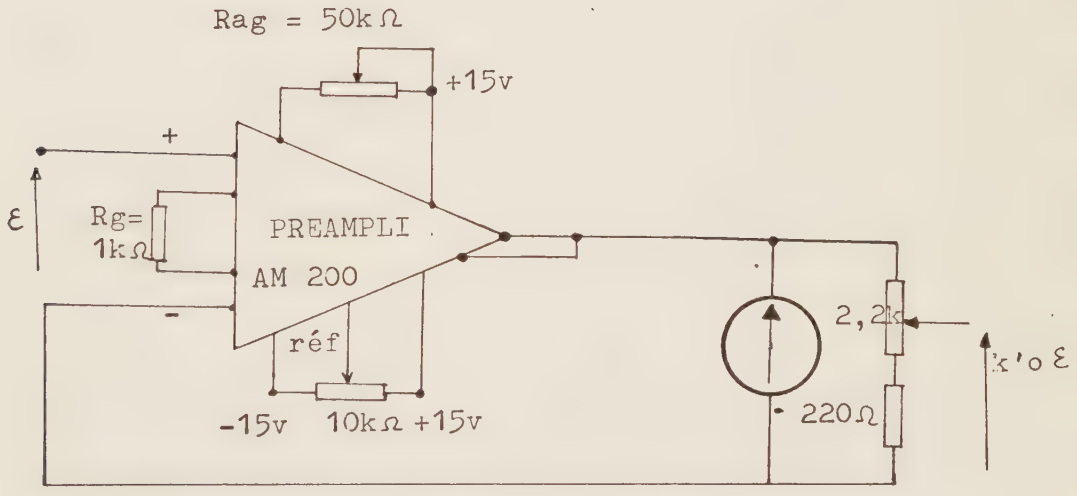
L'amplificateur que nous avons choisi est un amplificateur d'instrumentation - figure III.3.3.2a- à entrée différentielle , à très faible dérive ($1\mu V/°C$) et à impédance d'entrée élevée ($10^7\Omega$)

AMPLIFICATEUR DATEL type AM 200 C



$$\text{Gain} = \frac{Vs}{Ve} = \frac{Rf1 + Rf2}{Rg} = \frac{200k}{Rg}$$ (figure III.3.3.2a)

Montage réalisé :



Rag : résistance d'ajustement du gain

réf : réglage du zéro

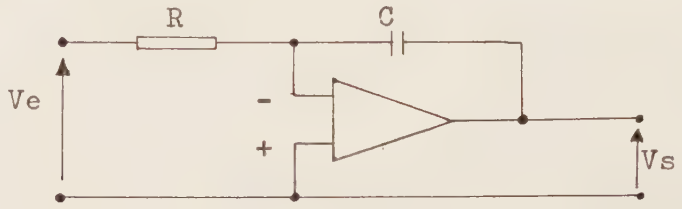
Le gain est ajusté à 160

AMPLIFICATEUR D'INSTRUMENTATION A ENTREES DIFFERENTIELLES	Type AM 200 D A T E L			
Caractéristiques définies à 25°C	mini.	nom.	maxi .	unités
Gain :				
. sur charge de 2 k-ohms en continu	2		10^3	
Niveau d'entrée :				
. en différentiel		$\pm$ 10		V
. en mode commun		$\pm$ 10		V
. réjection de mode commun		90		dB
Impédance :				
. en entrée différentielle		10^7		Ω
. en mode commun		10^{10}		Ω
. de sortie				
Température :				
. d'utilisation	-25		+75	°C
. de stockage	-25		+75	°C
Dérive en tension :				
. en température			1	µV/°C
. en fonction des alimentations			10	µV/V
Dérive en courant :				
. courant résiduel d'entrée			5	nA
. en température sur chaque entrée			0,5	nA/°C
Réponse en fréquence :				
. vitesse de balayage		2		V/µS
Niveau de sortie :				
. en tension		$\pm$ 11		V
. en courant		$\pm$ 5		mA
Alimentation :				
. tension	$\pm$ 14	$\pm$ 15	$\pm$ 19	V
.courant de repos		7		mA
Potentiomètre extérieur de réglage		10		k Ω

III.3.4. Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée :

III.3.4.1. Intégration par amplificateur opérationnel :

Lors de l'étude théorique du régulateur ; nous avons montré la nécessité d'effectuer une compensation intégrale afin d'augmenter la précision de l asservissement . Cette compensation est réalisée à l'aide d'un montage utilisant un amplificateur opérationnel - figure III.3.4.1a -



Nous avons , en considérant un amplificateur idéal :

$$-C\frac{dVs}{dt} = \frac{Ve}{R} \quad , \text{ d'où } \quad Vs = -\frac{1}{RC}\int_{o}^{t} Ve\, dt$$

Réponse en fréquence d'un intégrateur pur : (figure III.3.4.1b)

La fonction de transfert $G_{(p)}$ d'un intégrateur s'écrit :

$$G_{(p)} = \frac{1}{Tp} = \frac{1}{j\omega T}$$

La fonction a pour module $G(j\omega) = \frac{1}{\omega T}$

" " " " argument $\varphi = -\frac{\pi}{2}$

Le gain , exprimé en décibels , est défini par :

$$G_{(dB)} = 20 \log \frac{1}{\omega T} = -20 \log \frac{\omega}{\omega o} \quad \text{avec} \quad \omega o = \frac{1}{R.C}$$

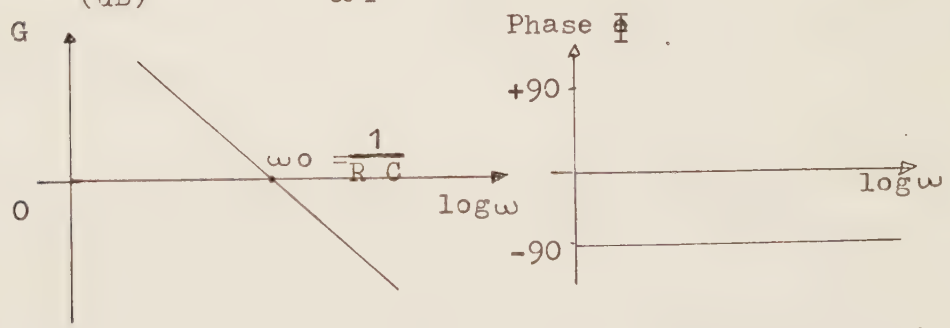
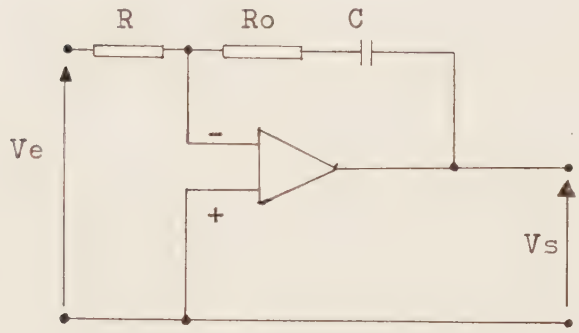


figure III.3.4.1b

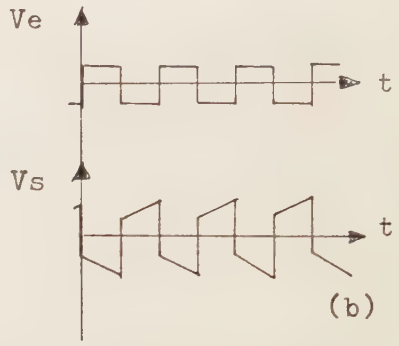
En fait , pour obtenir une fonction intégrale correcte , il faut choisir un amplificateur qui se rapproche de l'idéal , c'est-à-dire qui réponde aux critères suivants :

- courant de décalage faible (quelques pA)
- " différentiel "
- faible dérive de ces courants en température
- résistance différentielle d entrée élevée
- gain en boucle ouverte élevé
- faible dérive en tension (quelques uV/°C)

III.3.4.2. Fonction proportionnelle et intégrale :



(a)



figures III.3.4.2 a et b

Lorsque nous plaçons une résistance Ro en série avec la capacité C de contre réaction de l'intégrateur - figure a - , la réponse du circuit est la somme de deux termes : 1 un proportionnel au signal d entrée , l'autre proportionnel à l'intégrale,en fonction du temps , du signal d'entrée

$$- Vs = \frac{Ro}{R} \left(1 + \frac{1}{Ro\ Cp} \right) Ve$$

La figure b représente les variations de Vs et Ve , en fonction du temps .

III.3.4.3. Différentiation par amplificateur opérationnel :

Afin d'augmenter la stabilité de l'asservissement , nous avons pourvu le système d'une compensation dérivée , réalisée au moyen d'un montage utilisant un amplificateur opérationnel :

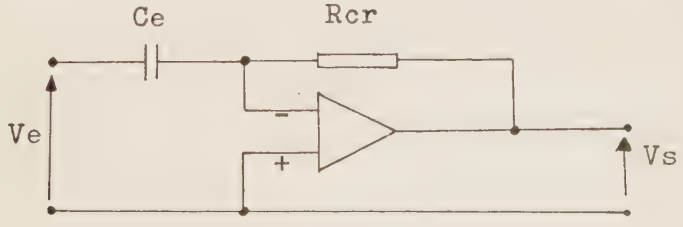


figure III.3.4.3a

Pour un amplificateur idéal , nous pouvons écrire :

$i = Ce \cdot \frac{dVe}{dt}$, le courant qui traverse Ce et Rcr , donc :

$-Vs = -\, i\, Rcr = Rcr\, Ce\, \frac{dVe}{dt}$

T = constante de temps = Rcr Ce -figure III.3.4.3a -

Réponse en fréquence :

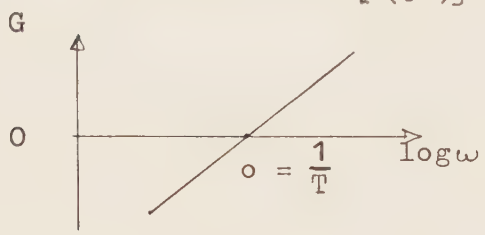
La fonction de transfert d'un différentiateur pur est :

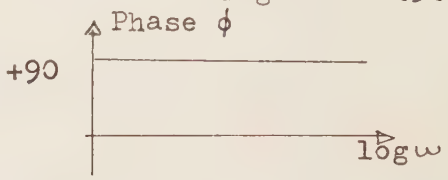
$J_{(p)} = jT\omega = Tp$

module : $|J_{(J\omega)}| = T\omega$

argument : $\arg\left[J_{(J\omega)}\right] = \frac{\pi}{2}$

- figure III.3.4.3b





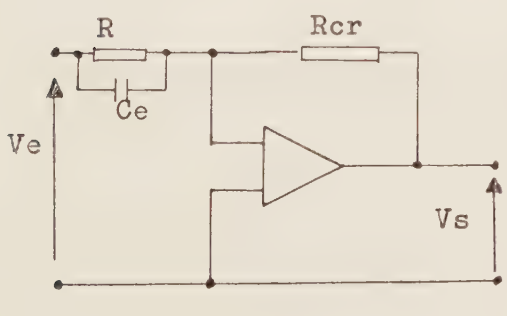
En pratique , le gain aux fréquences élevées est limité en ajoutant , en série avec Ce , une résistance Re .

III.3.4.4. Fonction proportionnelle et dérivée :

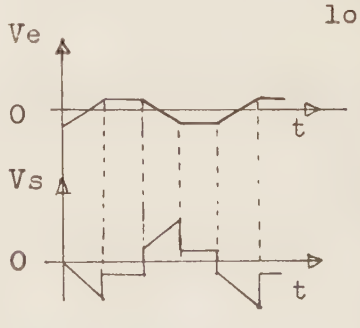
Lorsqu'une résistance R est placée en parallèle sur la capacité Ce d un différentiateur (figure III.3.4.4a), la réponse du circuit est la somme de deux termes , l'un proportionnel au signal d'entrée , l'autre à la dérivée en fonction du temps du signal d'entrée :

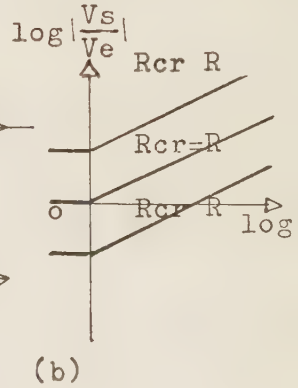
$-Vs = \frac{Rcr}{R}\,(1+Tp)\,Ve$ avec $T = R.Ce$

Les figures III.3.4.4.b. montrent les variations des signaux Vs et Ve en fonction du temps et la réponse en fréquence du gain



(a)



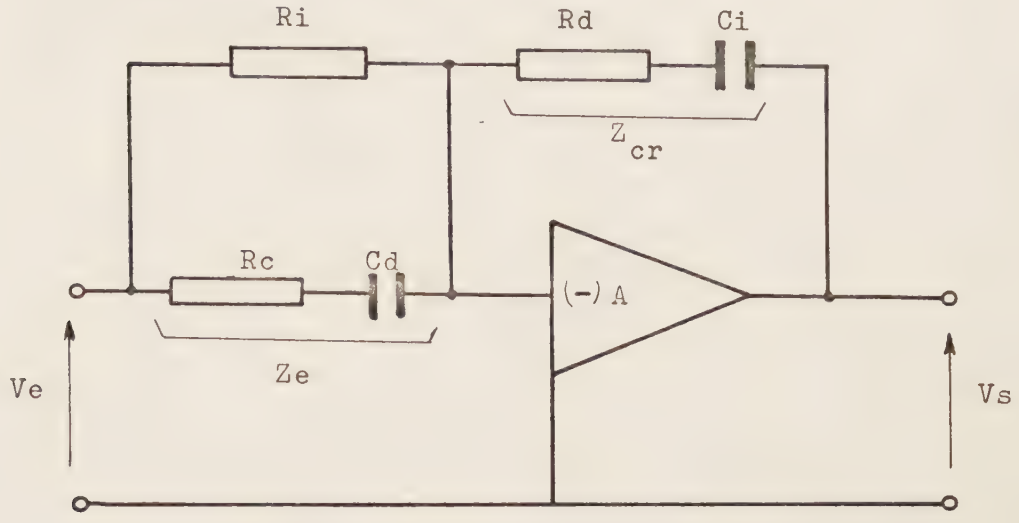


(b)

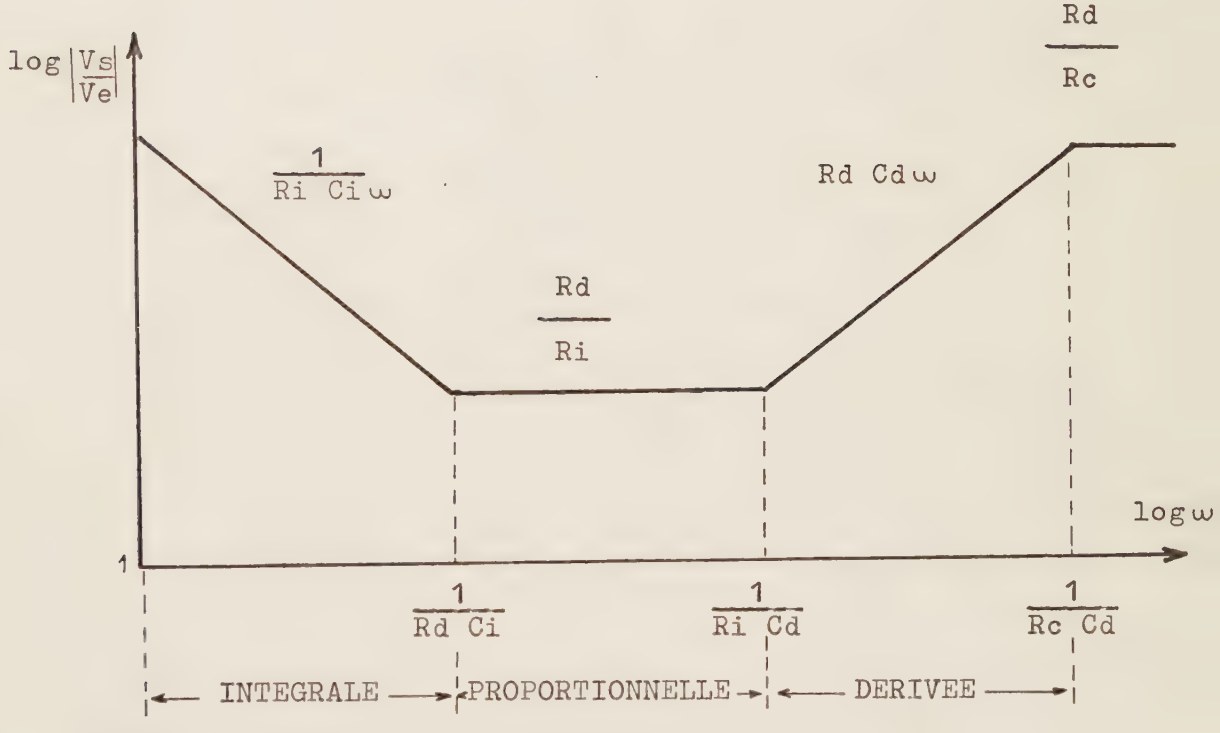
figures III.3.4.4 a et b

III.3.4.5. Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée:

- Fonction de transfert



(a)



(b)

Figure III.3.4.5. a et b

Considérons le crcuit représenté à la figure III.3.4.5a .

Nous avons la relation : $\frac{Vs}{Ve} = \frac{Zcr}{Ze}$

Soit $A_{(p)}$, la fonction de transfert définie par :

$$A_{(p)} = \frac{Zcr}{Ze}(p) \quad \text{avec} \quad Zcr = Rd + \frac{1}{Cip} \text{ et } Ze = \frac{Ri\left(Rc + \frac{1}{Cdp}\right)}{Ri+Rc+\frac{1}{Cdp}}$$

posons :

$RdCd = T_1$ $\qquad$ $RiCd = T_4$

$RiCi = T_2$ $\qquad$ $RcCd = T_5$

$RdCi = T_3$

les impédances opérationnelles deviennent :

$$Zcr = \frac{1+T_3p}{Cip} \qquad \text{et} \qquad Ze = Ri\left(\frac{1+T_5p}{1+(T_4+T_5)p}\right) \text{ , d'où :}$$

$$A_{(p)} = \frac{1+(T_3+T_4+T_5)p + T_3(T_4+T_5)p^2}{T_2(1+T_5p)p}$$

Si nous prenons :

$T_2 \neq T_4$ et $T_5 \ll T_4 \ll T_3$,soit Ci ≠ Cd et Rc≪Ri≪Rd ,

les simplifications effectuées conduisent à la relation :

$$A_{(p)} = \frac{Rd}{Ri} + \frac{1}{RiCip} + RdCdp$$

Actions : proportionnelle intégrale dérivée

Lorsque $p \longrightarrow 0$, $A_{(p)} = \frac{Rd}{Ri} + \frac{1}{RiCip}$ (actions proportionnelle et intégrale)

Lorsque p est grand , $A_{(p)} = \frac{Rd}{Re} + RdCdp$ (actions proportionnelle et dérivée)

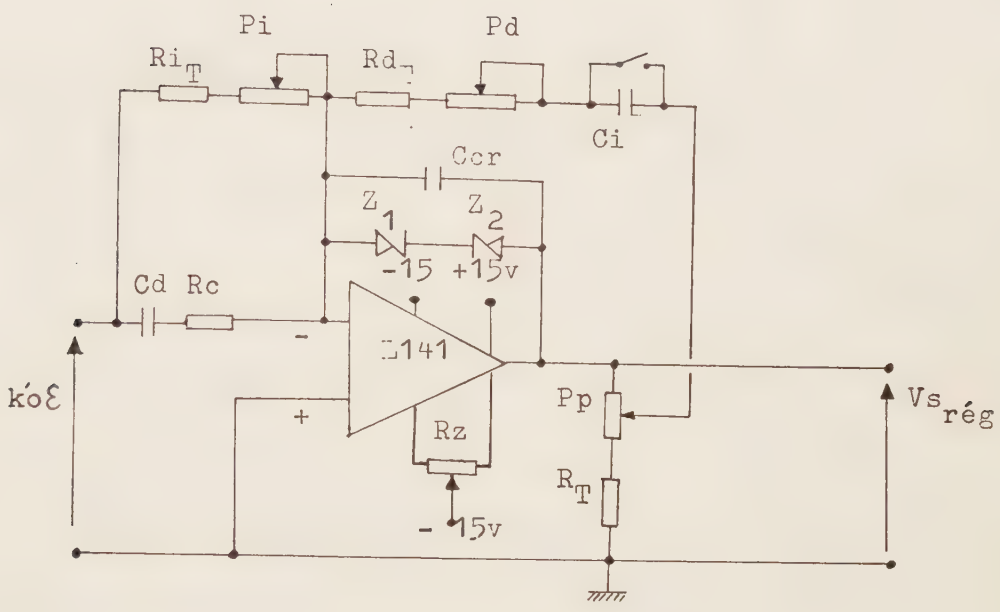
La réponse théorique d'amplitude en fréquence est représentée figure III.3.4.5b , où la bande proportionnelle BP est définie par :

$$\frac{1}{RdCi} \leq BP \leq \frac{1}{RiCd}$$

La fonction de transfert , ainsi réalisée , permet d'exprimer la tension de sortie en fonction du temps :

$$Vs_{(t)} = \frac{Rd}{Ri} Ve_{(t)} + \frac{1}{RiCi}\int_o^t Ve_{(t)}dt + RdCd\frac{dVe(t)}{dt}$$

III.3.4.6. Montage réalisé : - figure III.3.4.6 -



Ri$_T$ = 10 kΩ	Ci = 10 µF
Rd$_T$ = 47 kΩ	Cd = 22 µF
Rc = 10 kΩ	Ccr = 68 pF
Rz = 10 kΩ	
R$_T$ = 82 Ω	
Pi = 100 kΩ	Z$_1$ et Z$_2$ = BZY 88/C 5V6
Pd = 220 kΩ	
Pp = 2,2 kΩ	

Pp permet le réglage du gain du montage , sans altération de la courbe de réponse .

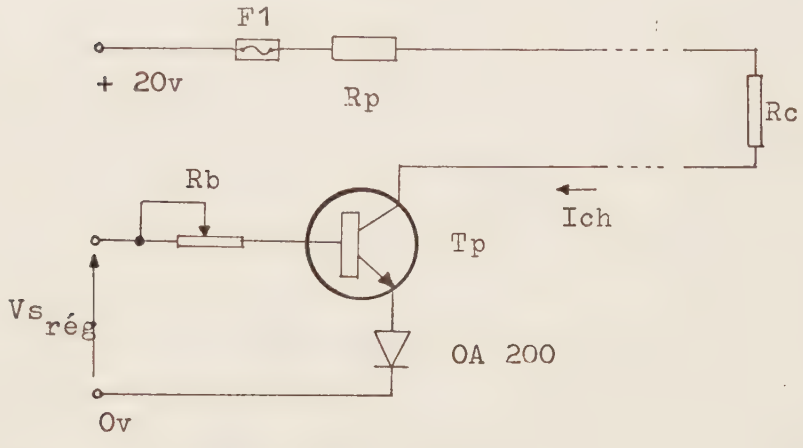
Les diodes Z$_1$ et Z$_2$, en opposition , limitent le gain de l'amplificateur pour une excursion trop importante du signal d'entrée.

Ccr compense la capacité de sortie et la partie capacitive de la charge , évitant ainsi des suroscillations .

AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL TYPE L 141 S G S				
Caractéristiques définies à 25°C	min.	nom.	max.	unités
Gain en boucle ouverte :				
• sur charge de 2 k-ohms en continu	2.10^4	10^5		
Niveaux de sortie :				
• en tension		$\pm$ 10	$\pm$ 14	V
• en courant			$\pm$ 5	mA
Niveaux d'entrée :				
• en différentiel		$\pm$ 30		V
• en mode commun		$\pm$ 15		V
• réjection de mode commun en continu		90		dB
Impédance d'entrée :	3.10^5	10^6		Ω
Température :				
• d'utilisation	0		+ 70	°C
• de stockage	0		+ 70	°C
Dérive en tension :				
• en température		6		µV/°C
• en fonction des alimentations		30	150	µV/V
Dérive en courant :				
• courant résiduel d'entrée			300	nA
Réponse en fréquence :				
• pour gain unité		0,5		V/µS
Alimentation :				
• tension		$\pm$ 15		V
Potentiomètre extérieur de réglage		10		k Ω

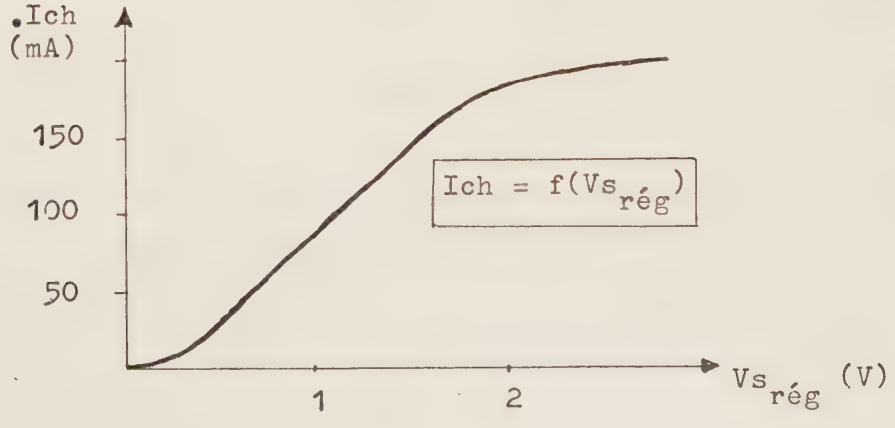
III.3.5. Amplificateur de puissance :

Les dimensions de la sonde,à réguler en température,sont très faibles , néanmoins , l'énergie électrique nécessaire $W = RI^2t$ transformée en chaleur par effet Joule , impose un courant d'environ 100mA circulant dans la résistance de chauffage de 100 ohms .
La sortie de l'étage régulateur étant limitée à 5mA , un amplificateur de puissance est nécessaire : - figure III.3.5a -



Rb : résistance d'étendue de 2,2 kohms
Tp : transistor de puissance - BC 440
Rp : résistance de protection de 22ohms , 5w
Rc : " " chauffage placée dans la sonde (100 Ω)
F1 : fusible de 500mA

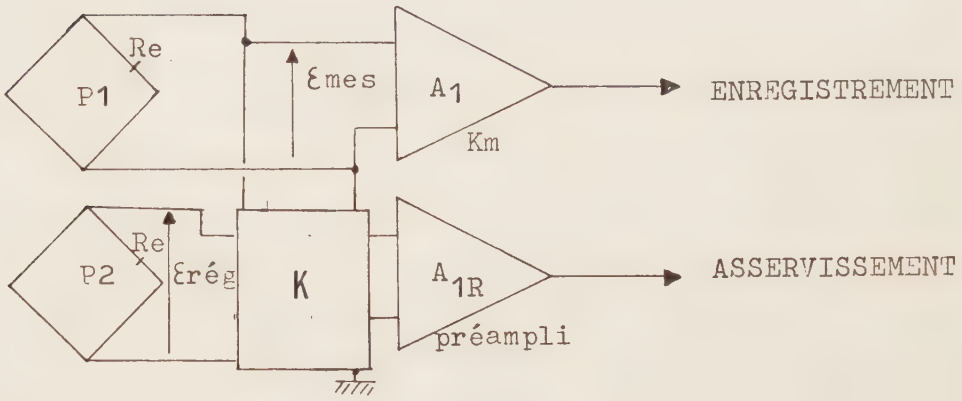
Courbe caractéristique: $Ich = f(Vs_{rég})$



III.3.6. Fonctionnement en adaptateur de température :

Le régulateur fonctionne de façon à asservir la température de régulation Θrég à la température à mesurer Θ , dont nous enregistrons les variations au cours du temps .

- schéma de principe :



- fonctionnement :

Les deux ponts P1 et P2 sont identiques et les repères Re sur chacun sont à la même température affichée.

A l'aide du commutateur K , nous opposons les tensions d'écart de mesure ($\mathcal{E}$mes) et de régulation ($\mathcal{E}$rég) et le nouvel écart $\mathcal{E}$a est appliqué au régulateur :

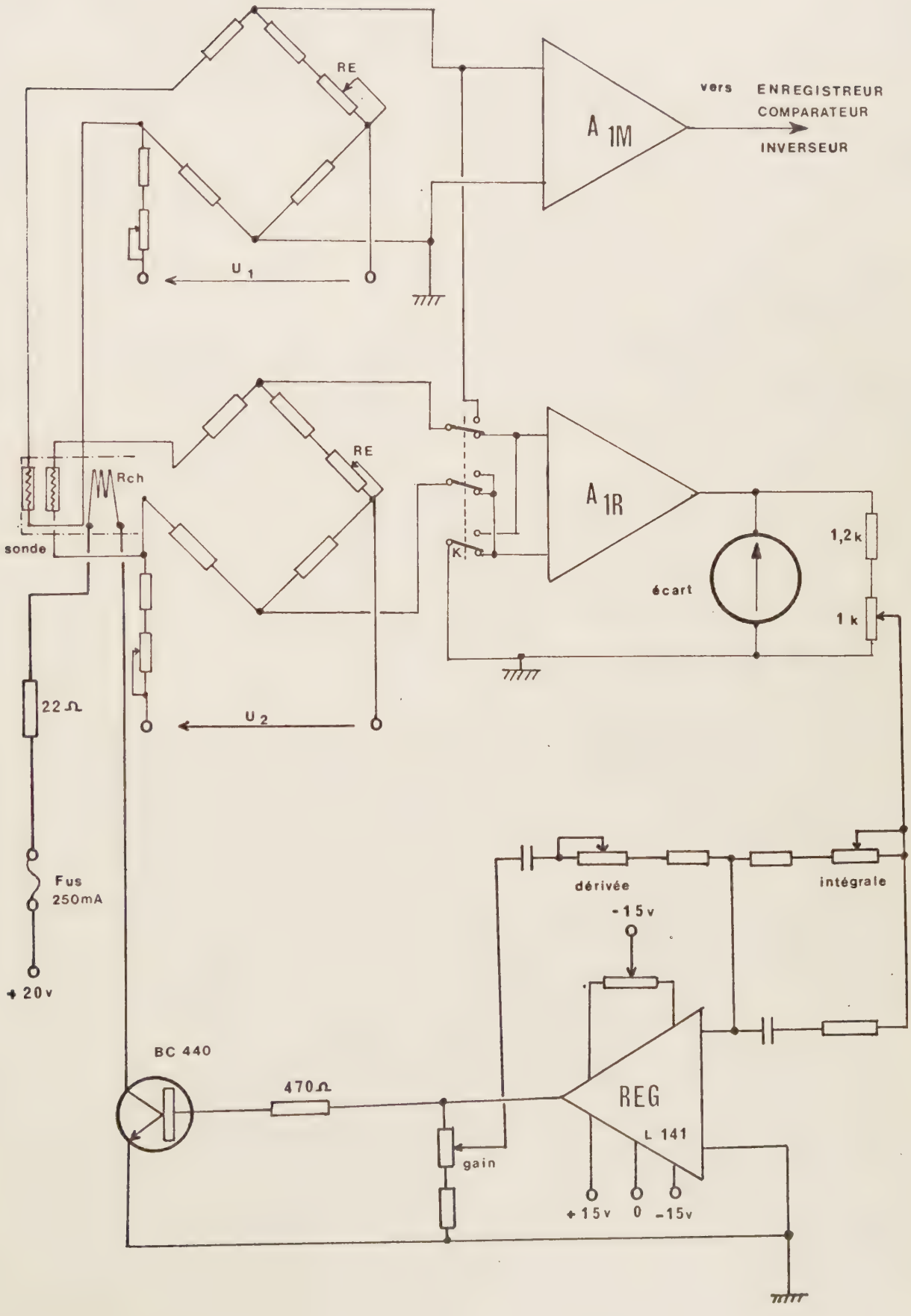
$$\mathcal{E}a = \mathcal{E}rég - \mathcal{E}mes$$

Le système de régulation tend à annuler l'écart $\mathcal{E}$a et :

$$\mathcal{E}rég = \mathcal{E}mes$$

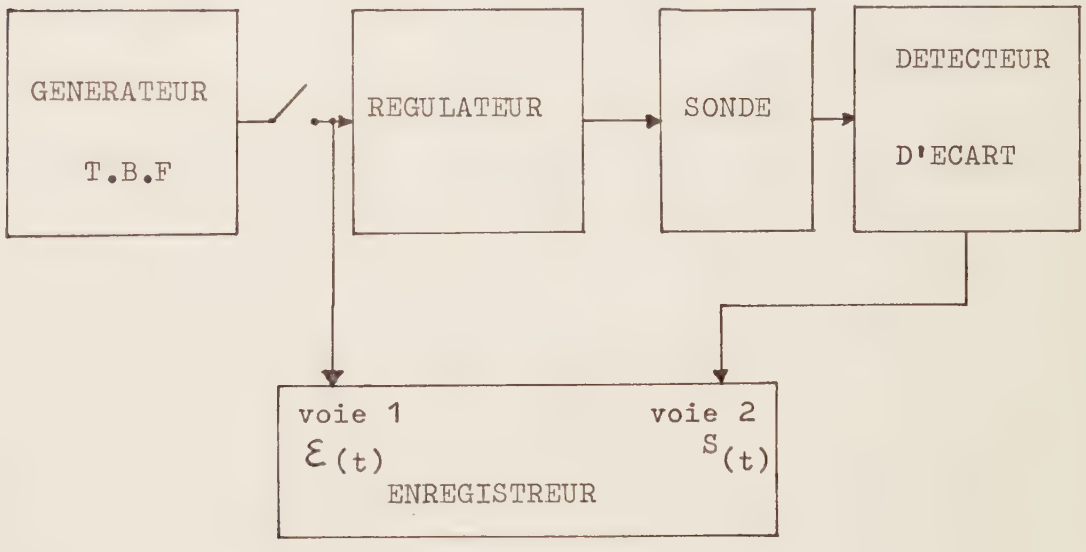
Nous enregistrons Km.$\mathcal{E}$mes qui représente l'écart de température par rapport à l'affichage Re .

III.3.7. Ensemble complet de régulation :



III.3.8. Etude de la stabilité :

Afin d'évaluer le degré de stabilité du système , nous avons tracé , dans le plan complexe , le lieu des points de la fonction de transfert $k\,G_{(p)}$ en boucle ouverte .
Pour ce faire , nous avons réalisé le montage représenté ci-dessous :

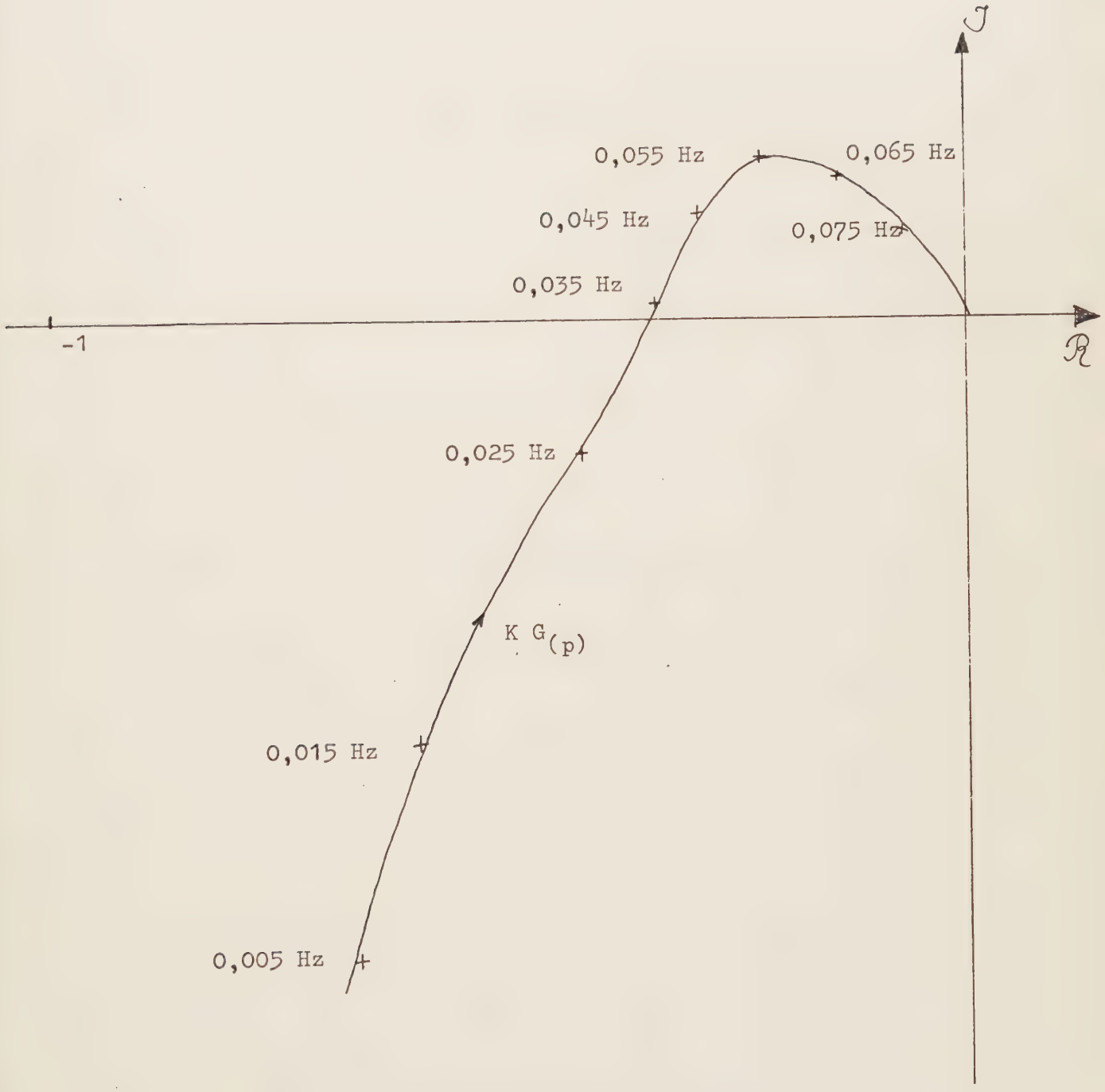


A l'aide d'un générateur très basse fréquence , nous appliquons à l'entrée du régulateur,un signal sinusoïdal .
Les signaux, à l'entrée et à la sortie du système, sont enregistrés simultanément, permettant ainsi de comparer les amplitudes et les phases .
L'exploitation de ces résultats pour différentes fréquences, permet le tracé du diagramme de Nyquist représenté figure III.3.8 où le degré de stabilité est défini par :

- une marge de phase de 49°
- une marge de gain de 9 dB

Le système est donc stable .

figure III.3.8.

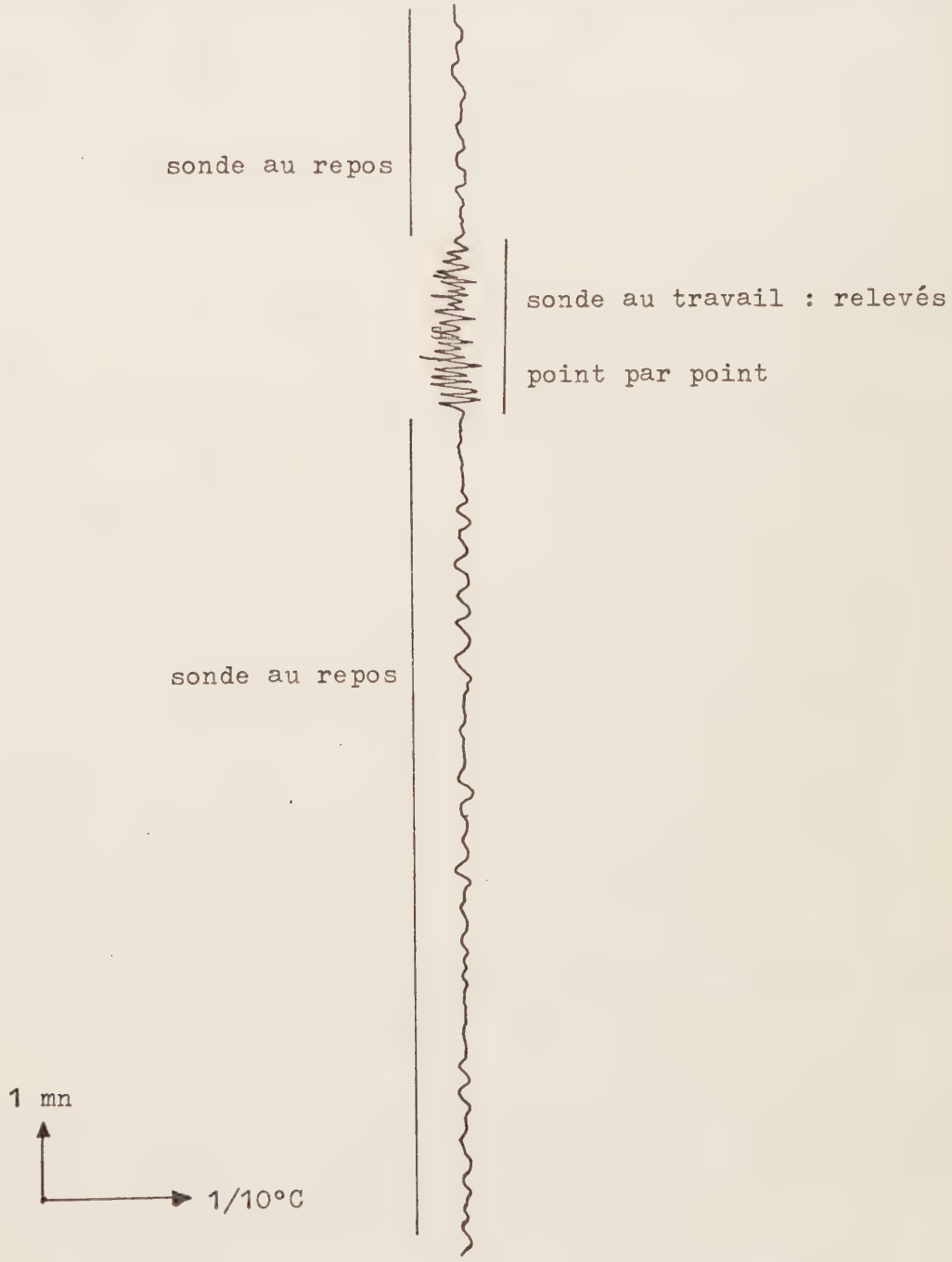


- diagramme de Nyquist -

III . 4 . PERFORMANCES :

III.4.1. Fonctionnement en barrière thermique : $\theta_{rég}$ doit être maintenu constant à une valeur de consigne affichée .

Enregistrement de l'écart mesure-consigne en fonction du temps:

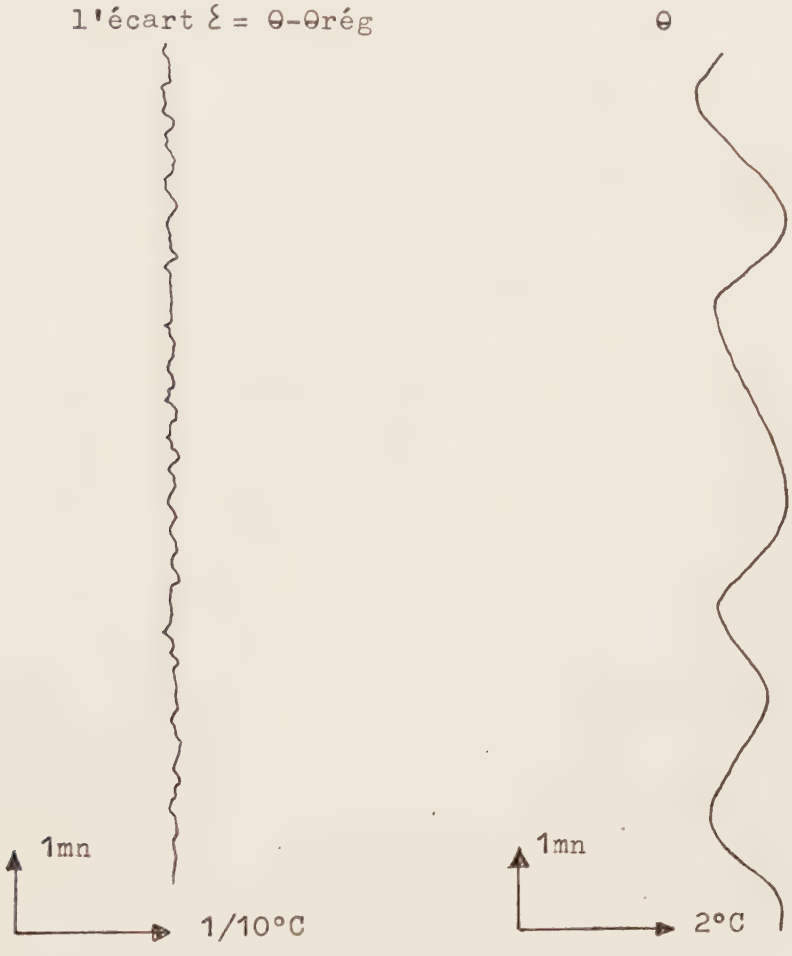


La variation maximum de l'écart mesure-consigne est de 1/20°C aussi bien pendant que la sonde est au repos qu'au cours d'explorations thermométriques .

III.4.2. Fonctionnement en adaptateur :

Nous faisons varier la température superficielle de l'index par garrottages successifs du bras .

Nous enregistrons simultanément en fonction du temps :



Lorsque θ varie de 1 ou plusieurs °C , nous constatons que l'écart ξ = θ - θrég reste inférieur à 1/20°C

Pour l'étude de l'évolution de θ pendant de longues durées (heure où jour), le modèle de sonde pourra être avantageusement remplacé par un autre , plat et adhérent à la peau .

CHAPITRE 4

IV. REPERAGE DE Θp ET Θréf

Lors de l'exploration d'une région cutanée par contacts intermittents de la sonde avec des zones ponctuelles , afin de libérer les yeux de l'opérateur de l'observation de l'enregistrement , des tops sonores de tonalités différentes et signaux lumineux sont émis lorsque les températures Θp (valeur de pic) et Θréf (valeur de référence) sont atteintes .
Les dispositifs de détection de Θp et Θréf utilisent le signal de mesure V^m_{s1} .

IV. 1 . PRODUCTION DU SIGNAL DE MESURE :

IV. 1 . 1 . Principe: (figure IV.1.1.)

De la même façon que pour la production du signal de mesure entrée régulateur , un pont analoque est constitué par la fine thermistance et des résistances métalliques à faible coefficient de température (de l'ordre de 10^{-5}/°C) et alimenté par un générateur de tension E doté d'une résistance d'ajustement Ra .
La tension de déséquilibre Vd du pont est appliquée à un amplificateur intégré de type A1 qui fournit,en sortie,un signal haut niveau V^m_{s1} représentant 0,4volt/°C .

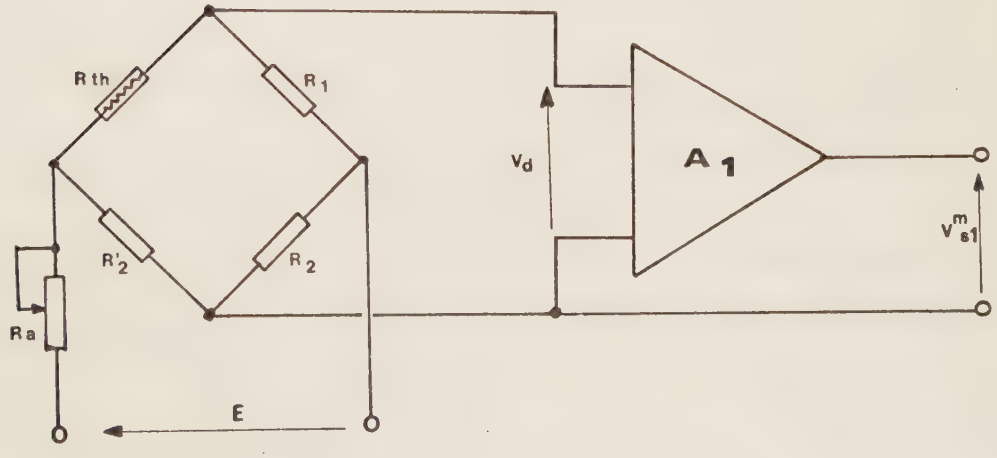
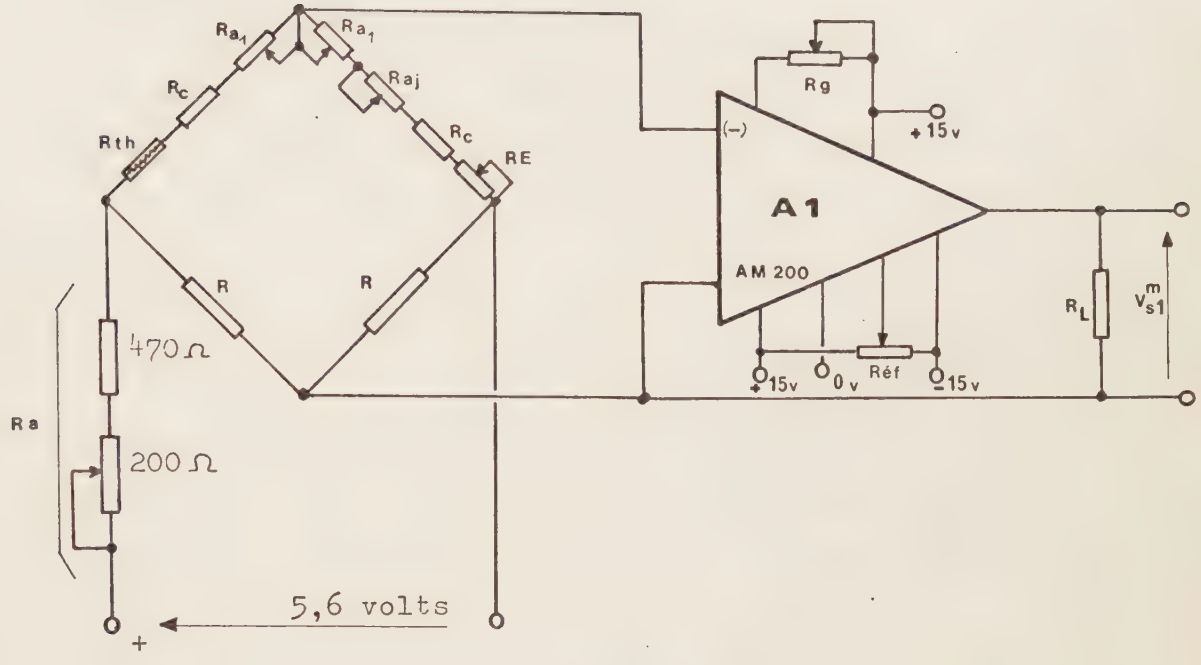


figure IV.1.1.

IV.1.2. Réalisation : (figure IV.1.2.)



La détermination des valeurs des éléments du montage est analogue à celle effectuée au paragraphe III.3.3.

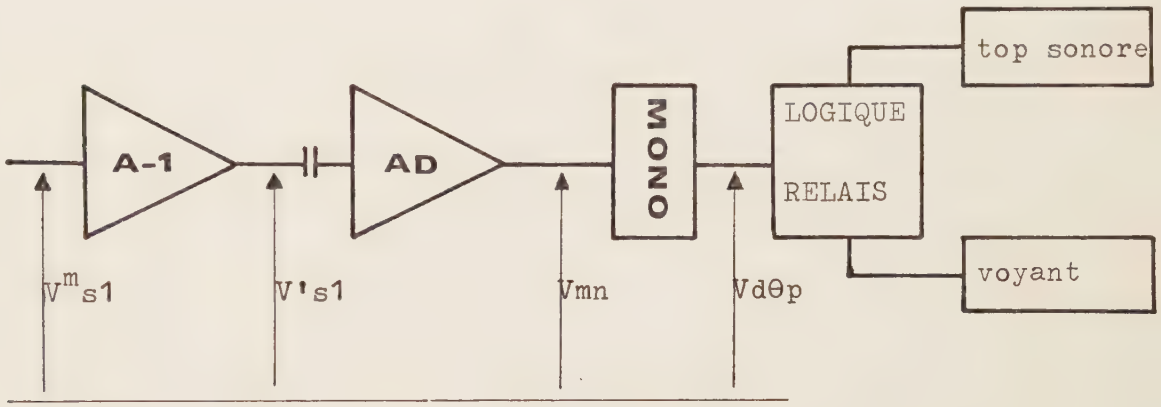
Ainsi:

RE:potentiomètre 10 tours d'équilibre du pont - 500Ω -
l'axe est solidaire d'un cadran gradué de 26 à 36°C
R:résistance de précision (0,1%) de 100Ω
Rth:résistance de la thermistance
Ra: " d'ajustement telle que Ep=1,515 v
Rc: 5,6kΩ
Raj:résistance de réglage du zéro du pont (2,2k réglé à 1450Ω)
Réf: " " " " " de l'amplificateur (10 kΩ)
Rg:résistance d'ajustement du gain de A1 (50 kΩ)
RL: " de charge de 2,2 kΩ
A1:amplificateur opérationnel d'instrumentation type A M 200C
Ra_1:résistances d'étalonnage - fonction des thermistances - 50Ω

IV. 2 . REPERAGE DE Θp :

IV.2.1. Principe de détection de Θp:

La tension $V^m s1$ à la sortie de l'amplificateur (A1)$_m$ est appliquée à l'entrée d'un inverseur (amplificateur A-1, de gain -1) dont le signal de sortie V's1 attaque un différentiateur AD suivi d'une bascule monostable (MONO) - figure IV.2.1a -



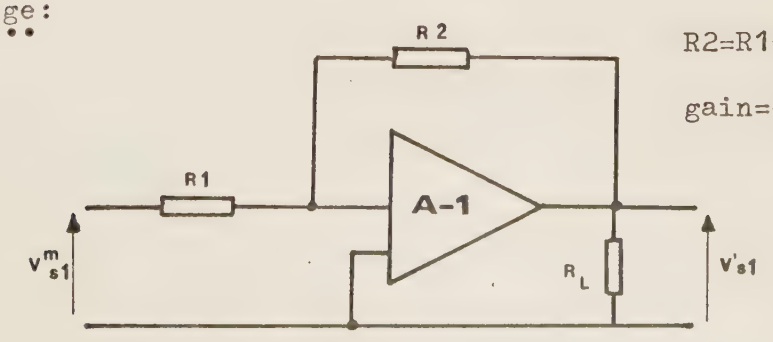
Le signal VdΘp , qui apparait pendant un temps de 300ms , provoque,par l'intermédiaire d'un relais , l'émission d'un top sonore de tonalité déterminée (grave,par exemple) et l'excitation d'un voyant lumineux de couleur (rouge,par exemple)

IV.2.2. Amplificateur inverseur A-1 :

Rôle: permet l'utilisation du signal V's1 , lié au signal d'entrée $V^m s1$ sans perturber celui-ci et une sortie Vmn , après l'étage suivant , de même signe que $V^m s1$

$$V's1 = -V^m s1$$

Montage:



R2=R1=2,2kΩ

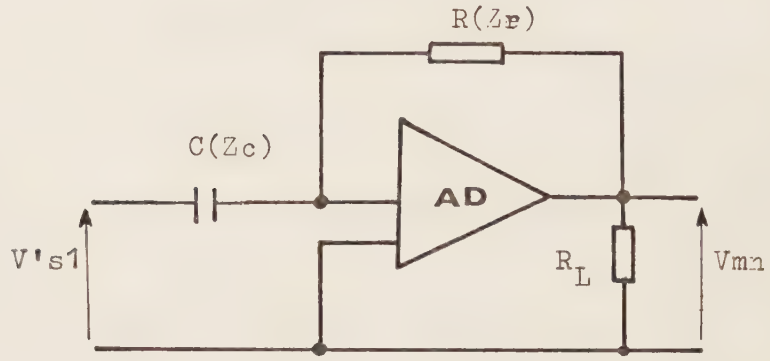
$$gain = -\frac{R2}{R1} = -1$$

IV.2.3. Amplificateur différentiateur AD :

Rôle : permet d'obtenir une tension de sortie Vmn telle que

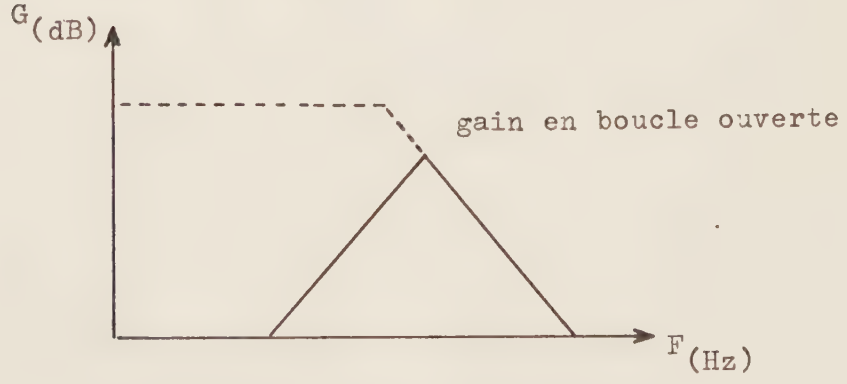
$$Vmn = - RC \frac{dV's1}{dt}$$

Montage de principe :



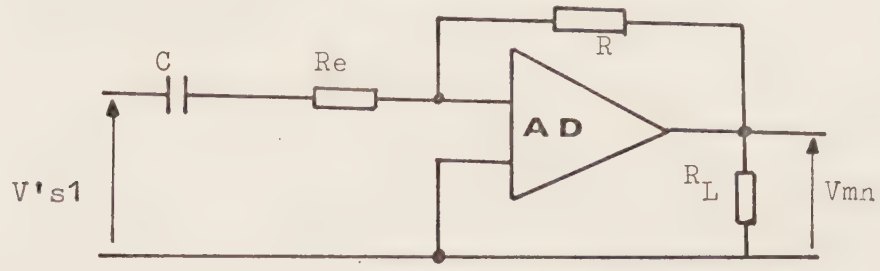
En courant continu l'impédance Zc du condensateur C est infinie ($Zc = \frac{1}{C\omega} \longrightarrow \infty$) , donc le gain $G = \frac{Zr}{Zc} \longrightarrow 0$
A la fréquence $Fo = \frac{1}{2\pi RC}$; nous avons Zc = Zr et G = 1

Courbe gain = f (fréquence) - diagramme de Bode - :

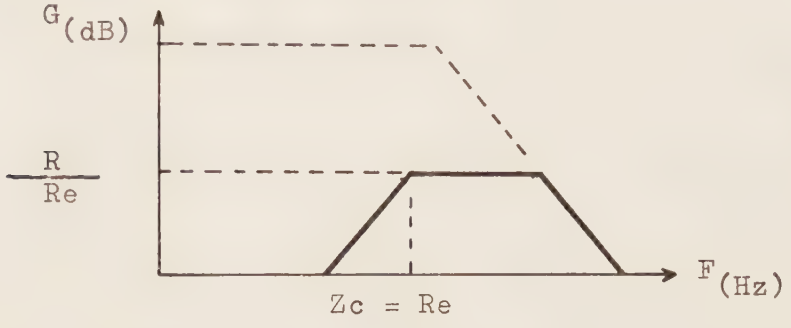


Le gain G augmente jusqu'au point de rencontre avec la courbe de réponse de l'amplificateur en boucle ouverte . En conséquence , les bruits parasites à fréquence élevée (alimentations alternatives , impulsions de fermeture et ouverture de contacts , ..etc) sont très amplifiés.

Nous remédions à cet inconvénient en utilisant un montage modifié qui a pour but de limiter le gain :

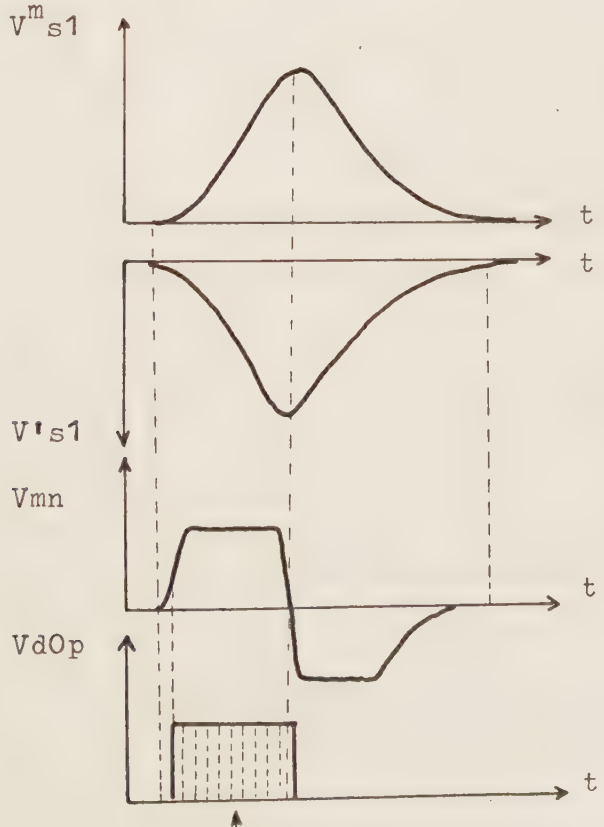


Le diagramme de Bode devient :



$$Fc = \frac{1}{2\pi Re.C}$$

IV.2.4. Monostable : le monostable , redéclenchable à tout instant par un niveau positif , produit un signal VdΘp à fronts raides , nécessaire pour commander les circuits logiques qui lui sont associés .



redéclenchements successifs par seuil Vmn positif .

IV.2.5. Réalisation :

IV.2.5.1. : Choix du matériel

• amplificateur inverseur A-1 : circuit SGS L141

• " différentiateur AD : SGS L141

• monostable : circuit intégré SGS type T118

- principe de fonctionnement : figure IV.2.5.1a

Le circuit comporte quatre entrées de déclanchement , dont deux "OU PAS"(NOR) actives au niveau bas , et deux autres "ET"(AND) actives au niveau haut .

Un différentiateur "DIFF" transforme les signaux d'entrée en impulsions brèves calibrées,indépendamment de la forme et de la durée des signaux incidents; il attaque le circuit "DECH", qui décharge très rapidement la capacité Cx jusqu'au seuil bas . Cx est ensuite rechargée par le courant s'écoulant dans la résistance extérieure Rx , jusqu'au seuil haut du comparateur "COMP" . Les valeurs des seuils sont compensées en température et asservies pour minimiser l'influence de la tension d'alimentation Vcc quand Rx est retourné au potentiel de Vcc .

Les étages en"pull-up" actif S1 et S2 délivrent les deux sorties Q et $\overline{Q}$ à basse impédance (chaque sortie peut attaquer 8 portes).

La série TTL T100 a été choisie en fonction de ses possibilités importantes en sortance , une haute immunité au bruit et une dissipation de puissance relativement faible .

- utilisation en monostable :

Ce circuit T118 ,peut être déclanché soit par des fronts montants soit par des fronts descendants , et délivre deux sorties complémentaires dont la durée D est fixée par la valeur des éléments passifs placés extérieurement : $\boxed{D \approx 0{,}35\ Cx\ Rx}$ (μS,nF,kΩ)

Le déclanchement a lieu dès que le signal d'entrée passe sur niveau haut et persiste si le niveau est encore haut à la fin de D.

- valeurs des éléments du montage :

Nous avons choisi une durée D = 0,2 seconde , ce qui impose :

Cx = 22 μF et Rx = 27 kΩ

IV.2.5.2. Schéma réalisé (figure IV.2.5.2.)

Schéma de principe

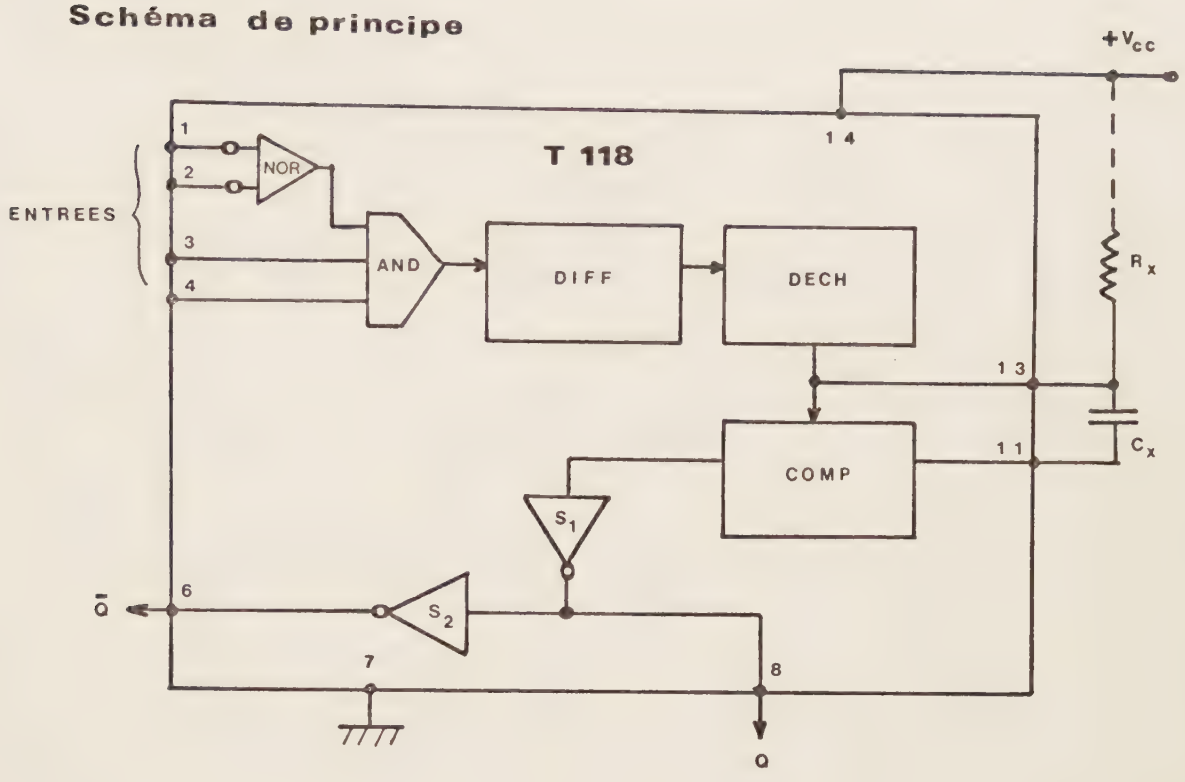


Diagramme des signaux

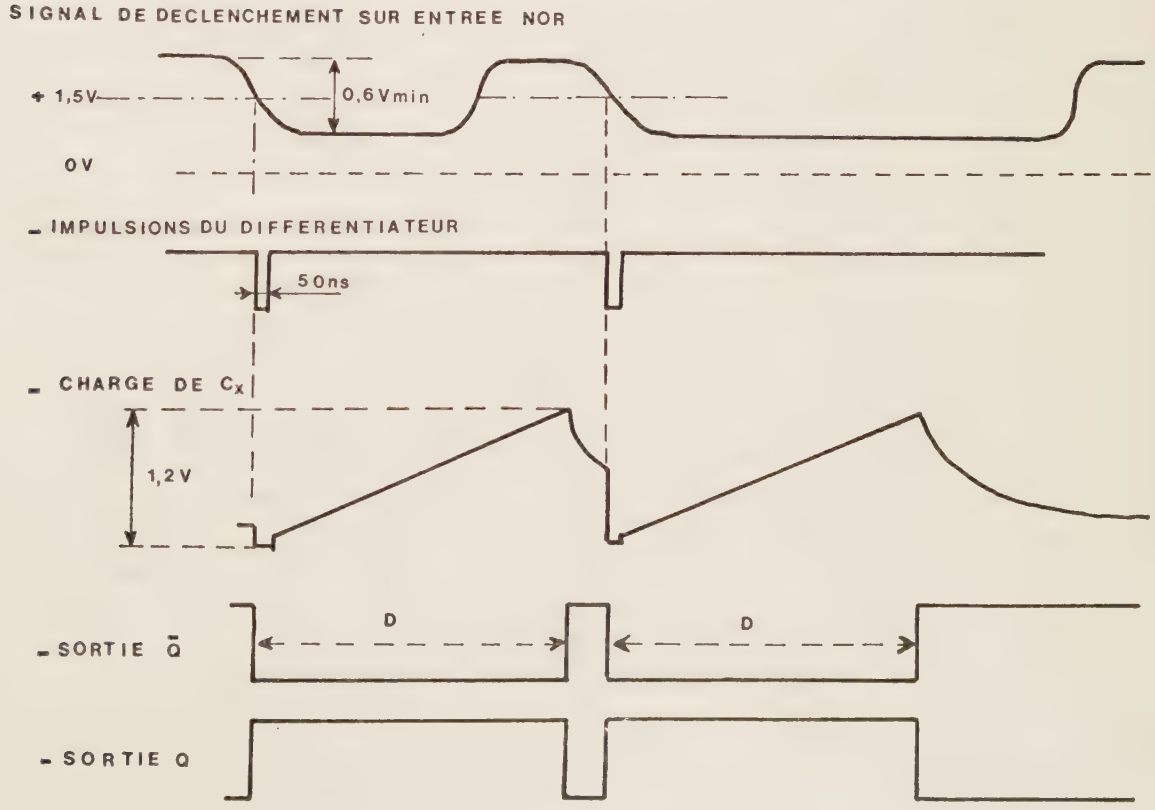


fig IV.2.5.1.

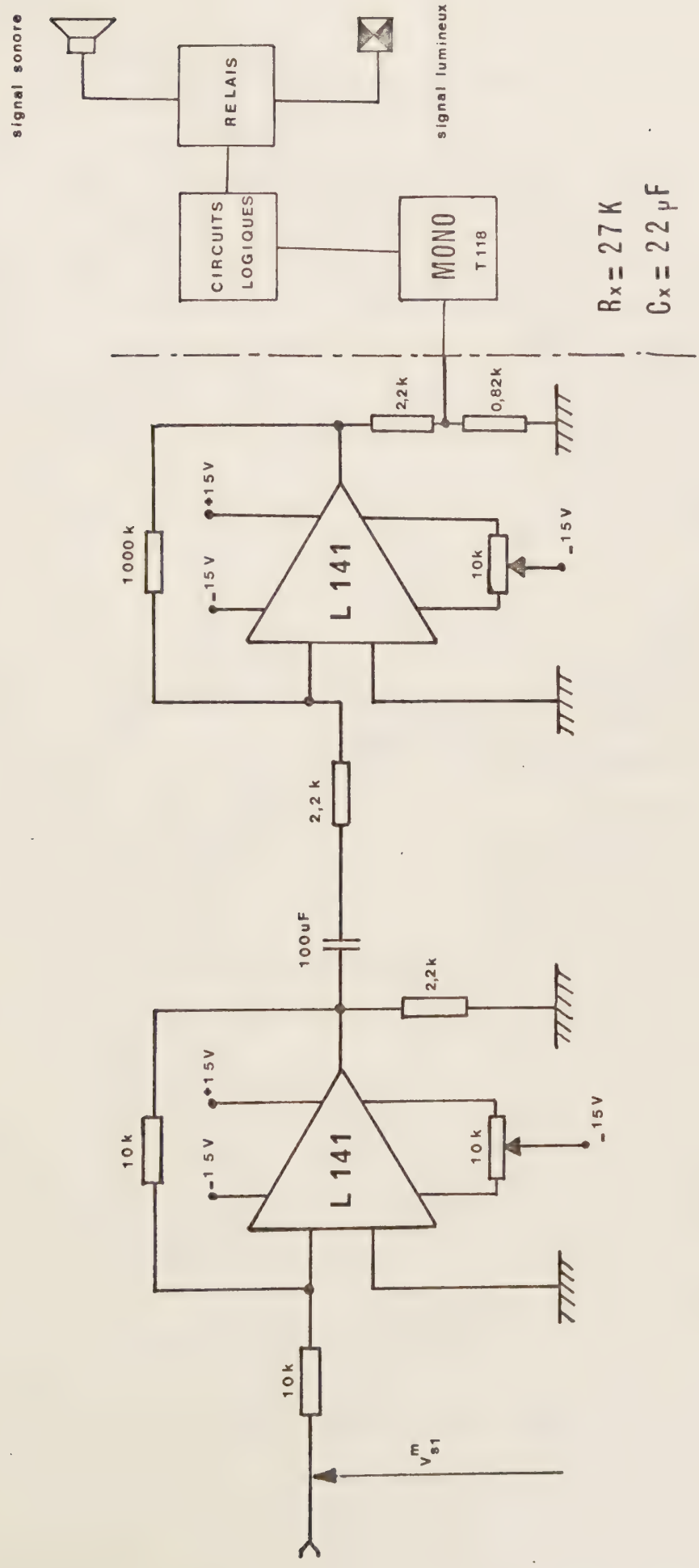

signal sonore
RELAIS
signal lumineux
CIRCUITS LOGIQUES
MONO T 118
Rx = 27 K
Cx = 22 µF
2,2k
0,82k
1000 k
+15 V
-15 V
L 141
10k
-15 V
2,2 k
100uF
2,2k
10 k
+15 V
-15 V
L 141
10k
-15 V
10 k
V_{s1}^{m}

fig. IV_2_5_2

IV. 3 . REPERAGE DE θréf :

IV.3.1. Principe de détection de θréf :

A une température Oréf , fixée au gré de l'opérateur , correspond une tension $V^m s1_{(réf)}$ à la sortie de l'amplificateur $(A1)_m$.
Nous disposons d'une tension réglable V" que nous ajustons à une valeur $V"_1$ légèrement supérieure à $V^m s1_{(réf)}$.
La tension u' = ($V^m s1$ - V") est appliquée (figure IV.3.1.) à l'entrée d'un comparateur qui , lorsque u' devient négative , fournit un signal de sortie VdOréf qui, par l'intermédiaire d'un relais , provoque l'émission d'un signal sonore d'une tonalité aigue et l'excitation d'un voyant de couleur verte .

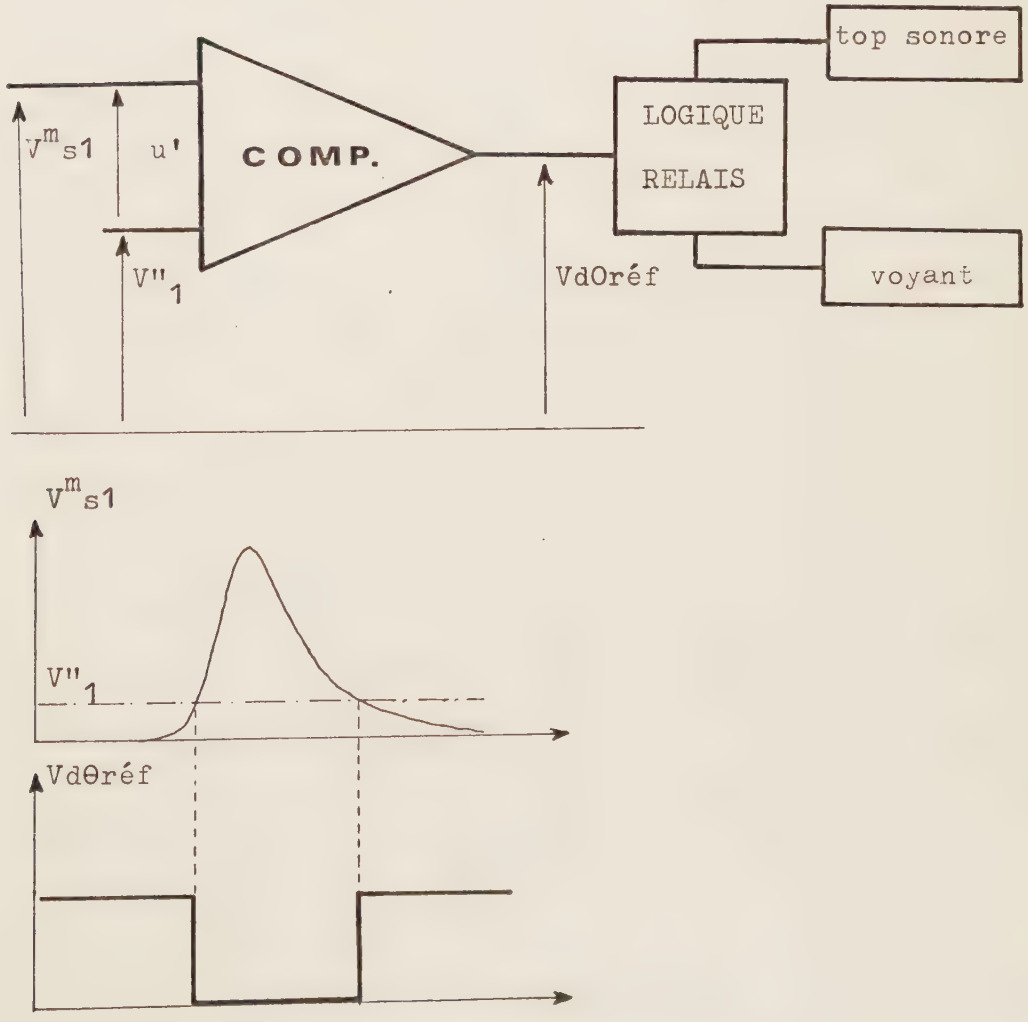


figure IV.3.1

IV.3.2. Réalisation :

IV.3.2.1. choix du matériel :

. le comparateur employé est fabriqué par INTERSIL et de type ICL 8001C . (figure IV.3.2.1a)
Il a été choisi en fonction de ses caractéristiques décrites à la page suivante . Ce circuit peut être utilisé directement avec des circuits logiques TTL alimentés en 5volts continus .
(figure IV.3.2.1b)

Circuit équivalent au comparateur ICL 8001 :

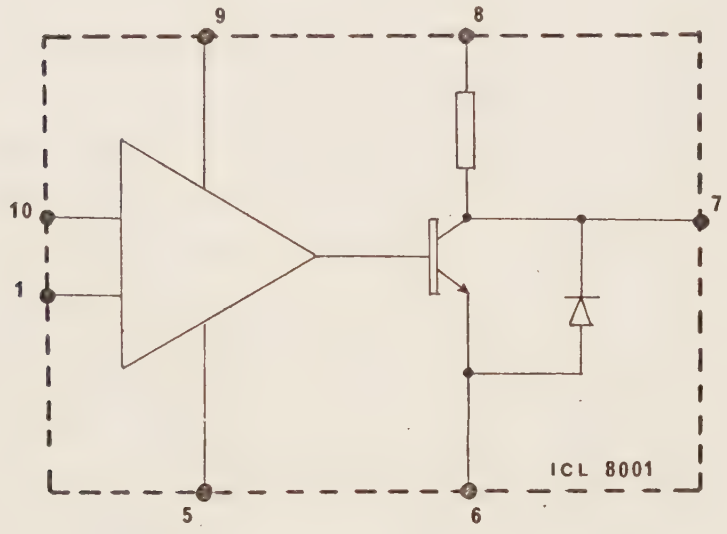


figure IV.3.2.1a

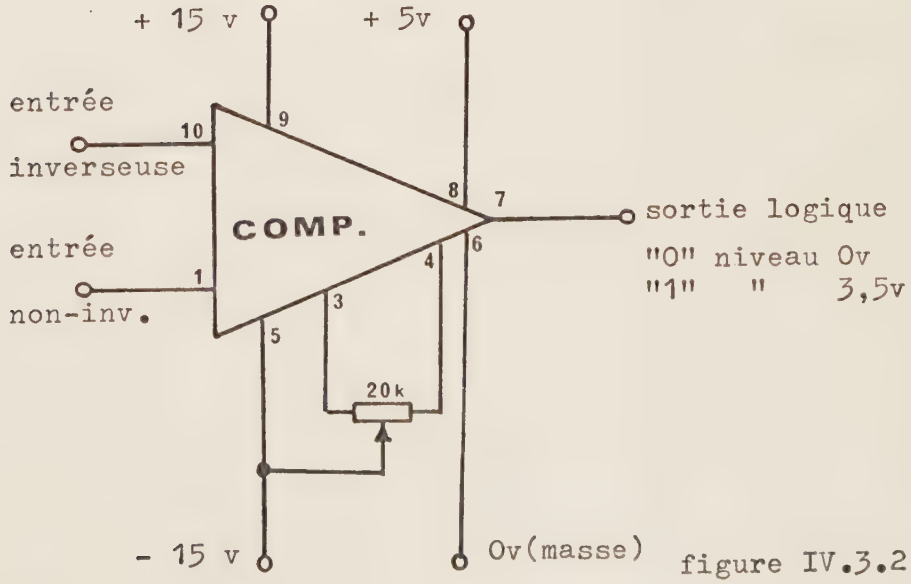
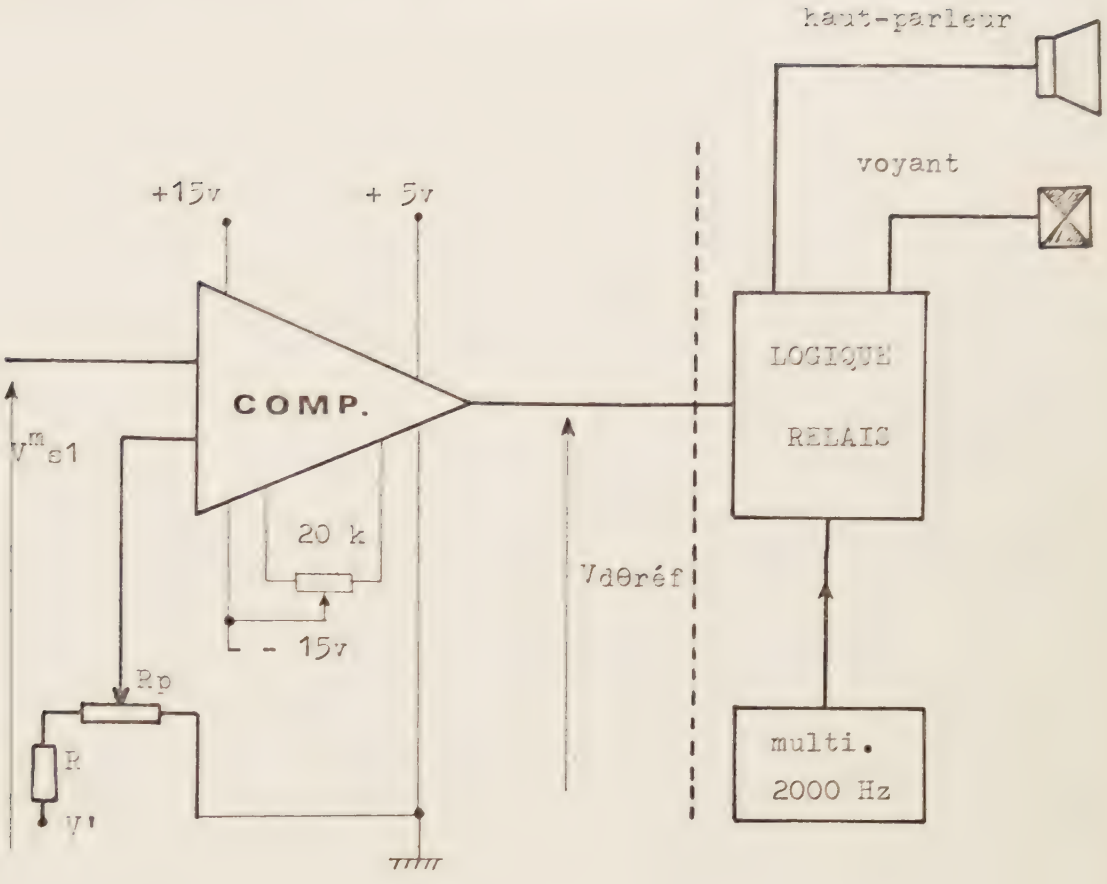


figure IV.3.2.1b

COMPARATEUR TYPE 8001			INTERSIL	
Caractéristiques définies à 25°C	mini.	nom.	maxi,	unités
Gain en boucle ouverte :				
• sur charge de 5 k-ohms en continu	15.10^3		60.10^3	V/V
Niveau de sortie :				
• en tension	7	9		V
• en courant			2	mA
Niveau d'entrée :				
• en différentiel		± 10	± 15	V
• en mode commun				
réjection de mode commun en continu	70	90		dB
Impédance :				
• en entrée différentielle		10^7		Ω
• en mode commun				
• en sortie				
Température				
• d'utilisation	- 25		+ 85	°C
• de stockage	- 25		+ 85	°C
Dérive en tension :				
• en température		2	20	µV/°C
• en fonction des alimentations			300	µV/V
Dérive en courant :				
• courant résiduel d'entrée			250	nA
• en température sur chaque entrée		35		pA
Réponse en fréquence :				
• à tension de sortie maxi		250		nS
Alimentation :				
• en tension		± 15 + 5		V V

IV.3.2.2. Schéma réalisé :



V' = 5,6 v
Rp = 470 Ω
R = 4700 Ω

Le potentiomètre Rp permet de décaler positivement le seuil de détection du retour à la référence (Θréf) .

Le signal de sortie du comparateur (VdΘréf) , par l'intermédiaire de cicuits logiques et de relais , commande le signal lumineux et sonore (le haut parleur est alimenté par une tension de fréquence 2000 Hz fournie par un multivibrateur - multi -)

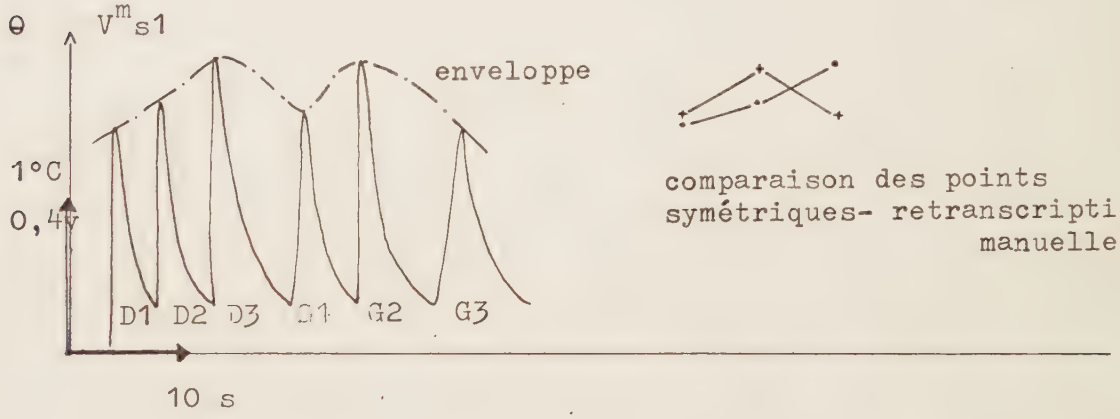
CHAPITRE 5

V . ENREGISTREMENT

V.1. ENREGISTREMENT DE θ = f (t) :

V.1.1. Relevés de température cutanée par contacts brefs et répétés

L'enregistrement de θ = f (t) , en fait de $V^m s1 = f (t)$ puisque V^m est lié à θ , est possible avec un enregistreur d'étendue 1volt environ (0,4V/°C) et de vitesse de déroulement suffisamment rapide pour distinguer les pics (environ 60 mm/mn) - figure V.1.1. -



comparaison des points symétriques- retranscription manuelle -

Ce système d'enregistrement , simple et peu coûteux , n'est cependant pas élaboré puique l'opérateur doit intervenir manuellement soit en traçant la courbe enveloppe (qui donne le profil thermique de la ligne explorée) soit en comparant les points symétrique un à un .

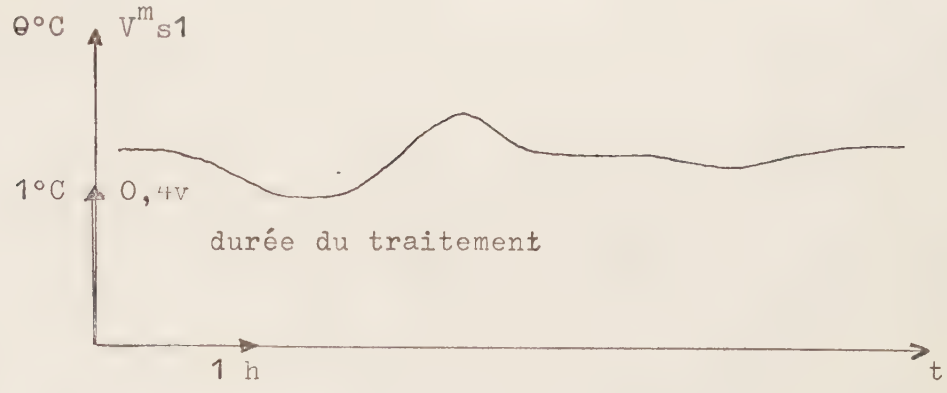
V.1.2. Relevé de température par contact permanent :

Lorque nous faisons fonctionner la sonde en adaptateur de température , nous pouvons suivre l'évolution de θ superficielle , au cours d'un traitement par exemple .

La vitesse de déroulement de l'enregistreur doit être en rapport avec celle de l'évolution de température attendue et celle du traitement - figure V.1.2. -

. . .

Figure V.1.2.



V.2. ENREGISTREMENT SUR TABLE X Y :

Fréquemment , en vue de diagnostic , des zones ponctuelles symétriques par rapport au plan médian du corps sont alternativement explorées à droite et à gauche . Il y a donc intéret à inscrire sur une même verticale les repères θp correspondants à tout couple de points symétriques droits et gauches . Ainsi , en reliant les repères droits et les gauches , nous obtenons deux thermodiagrammes manifestant en étendue et en grandeur l'asymétrie thermométrique .

Le système , décrit ci-après , permet de commander automatiquement l'inscription des repères θp en réalisant les opérations suivantes:

. abaissement du stylet scripteur et marquage des repères θp droits et gauches suivant des axes parallèles à Oy , l'un sous forme de point , l'autre sous forme de tiret pour tout couple de points cutanés corrélatifs .

. décalage d'une longueur définie du chariot scripteur suivant Ox après inscription de deux repères corrélatifs .

V.2.1. Commande Y et du stylet scripteur :

. commande Y : la tension appliquée à la voie Y est $V^m s1$, représentant notre signal de mesure .

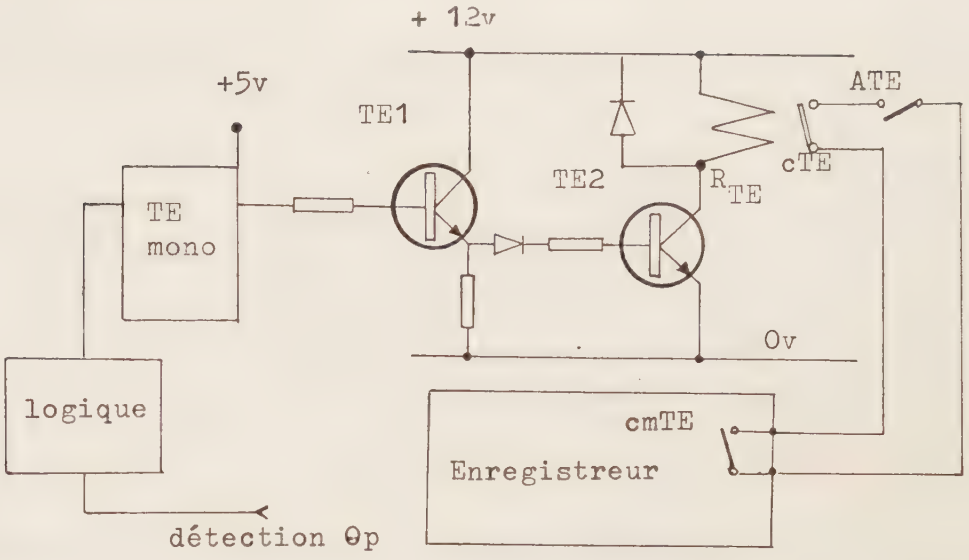
. commande du stylet scripteur :

But : le stylet doit être commandé à chaque fois que θp est obtenu

Principe : la fermeture d'un contact commandé par θp prœvoque l'excitation du stylet .

. . .

• Réalisation : - figure V.2.1 -



• Fonctionnement : le signal de détection de Θp excite le monostable TE qui fournit un signal positif débloquant les transistor TE1 et TE2 et l'excitation du relais R_{TE} . Le contact cTE, en parallèle avec le contact cmTE de commande manuelle du stylet de l'enregisteur , ordonne l'abaissement du marqueur pendant 300ms . L'interrupteur ATE , placé en série avec cTE permet d'interdire le fonctionnement en automatique (lorsque l'appareillage est en attente , par exemple) .

V.2.2. Commande X :

• But : la commande de la voie X ou plus exactement de la tension V_X est d'une importance capitale pour déplacer le chariot suivant Ox (réalisation du tiret et de l'espace) .

• Principe : la tension V_X est fournie à la sortie d'un intégrateur - figure V.2.2.a -
V_X est incrémentée en fonction du temps de fermeture du contact T qui injecte à l'entrée de l'intégrateur la tension Ve .

nous avons : $- C \frac{dVx}{dt} = \frac{Ve}{R}$

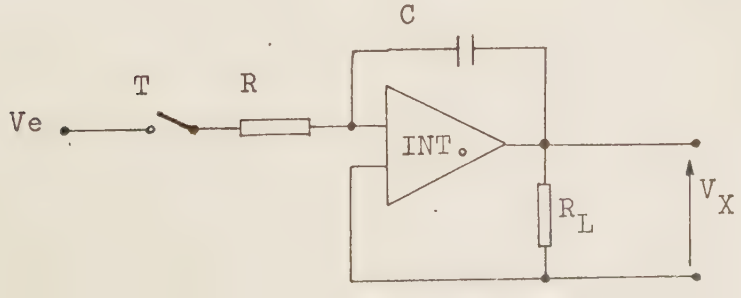


fig. V.2.2.a

. Réalisation : - figure V.2.2.b -

- le monostable X1 est excité par le changement de niveau de la tension de commande du tiret (une mesure sur deux) et délivre un signal qui , par l'intermédiaire de T11 , T12 , RX1 , provoque la fermeture de cX1 . Ce contact cX1 injecte la tension -15v à l'entée de l'intégrateur qui voit sa tension de sortie V_X incrémentée d'une valeur $\Delta V_X = 0,02v$

- le monostable X2 est excité par le changement de niveau de la tension de commande de l'espace (après la deuxième mesure) et de la même façon, un contact cX2 est fermé pendant un temps plus long (environ 200ms) . La sortie de l'intégrateur est alors incrémentée d'une valeur $\Delta V'_X = 0,1v$

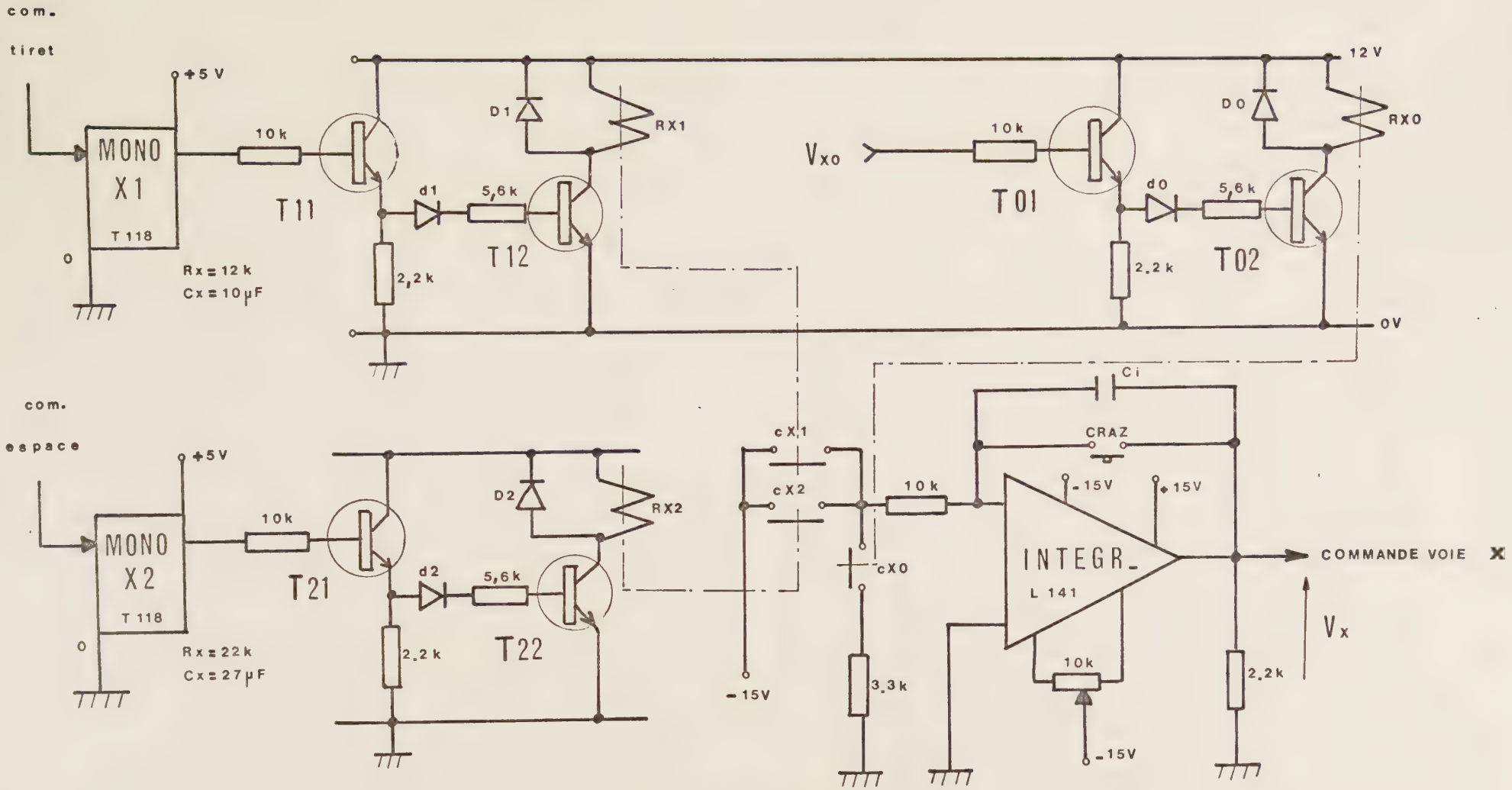
- le signal Vxo , issu d'un circuit logique décrit au chapitre suivant , provoque la fermeture du contact cXO qui met l'entrée de l'intégrateur au potentiel de la masse et verrouille ainsi sa commande , ce qui a pour effet de limiter la dérive .

- le contact CRAZ , bouton poussoir placé sur la face avant de l'appareil , permet la remise à zéro de la tension V_X par décharge de la capacité Ci .

- les commandes "tiret" et"espace" sont des signaux logiques issus de circuits décrits par la suite .

- l'excitation du monostable X2 (commande d'espace) peut aussi être manuelle à l'aide d'un bouton poussoir placé sur la face avant de l'appareil . Cette commande manuelle permet de cadrer les différents relevés que nous pourrons effectuer sur une même feuille lors d'un examen complet .

. . .



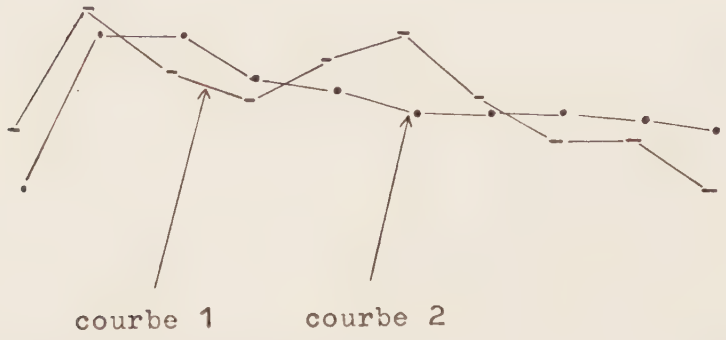
T_{ij} = 2 N 1711

C_i = 47 µF

D_i = di = O A 100

fig. V.2.2.b

V.2.3. Exemple d'enregistrement :



En reliant les repères droits (les points par exemple) , puis les repères gauches (les tirets) inscrits pratiquement sur la même verticale , nous obtenons deux thermodiagrammes - courbes 1 et 2 - très facilement comparables .

CHAPITRE 6

VI. SYSTEME LOGIQUE ASSOCIE AUX COMMANDES DE REPERAGES ET D'ENREGISTREMENT

VI.1. PROBLEMES POSES :

VI.1.1. Repérage de Θp :

VdΘp provoque l'émission (FM) d'un top sonore et d'un signal lumineux si :

- VdΘréf a été détecté avant
- le monostable TE , qui fixe la durée du top a été excité

VI.1.2. Repérage de Θréf :

Le signal VdΘréf provoque l'émission continue d'un signal sonore RR et lumineux :

- si le top FM a été effectué
- au début des mesures , après une remise à zéro de la logique .

VI.1.3. Enregistrement sur table X Y :

VI.1.3.1. Commande du stylet scripteur : à chaque fois que FM est émis , à condition que le contact d'interdiction ATE soit fermé et l'interrupteur cmTE ouvert , le stylet est actionné .

VI.1.3.2. Commande des repères : - tiret et point -
Une fois sur deux , la sortie de l'intégrateur commandant la voie X de l'enregistreur est incrémentée en même temps que le stylet scripteur est abaissé (repère : tiret)

VI.1.3.3. Commande de l'espace :
Après deux mesures , la sortie de l'intégrateur est incrément de nouveau : le chariot se déplace suivant Ox d'une distance déterminée .

. . .

VI.2. MISE EN EQUATIONS :

Le système décrit ci-après est traité en logique " positive " , c'est-à-dire que les états 1 et 0 sont considérés comme suit :

- état 1 : la valeur de la tension représentative est celle du niveau le moins négatif
- état 0 : la valeur de la tension représentative est la plus négative .

Symboles d écritures :

- " X " : état 1 de X
- " $\overline{X}$ " : état 0 de X
- fonction ET : .
- fonction OU : +

VI.2.1. Repérage de Θp : $\boxed{FM = \overline{VdΘréf} \cdot TE}$ (1)

L'obligation , pour l opérateur , d'attendre que Θréf soit détecté pour effectuer une nouvelle mesure impose de positionner une bascule bistable B1 à chaque détection Θp et Θréf . (1) s'écrit alors :

$$\boxed{FM = B1 \cdot TE}$$

VI.2.2. Repérage de Θréf : $\boxed{RR = (RAZ\ LOG + \overline{FM}) \cdot VdΘréf}$

VI.2.3. Enregistrement sur table X Y :

- commande du stylet (CS) : $\boxed{CS = TE \cdot ATE \cdot \overline{cmTE}}$
- " des repères : tiret (cT) $\boxed{cT = B2 \cdot VdΘp}$

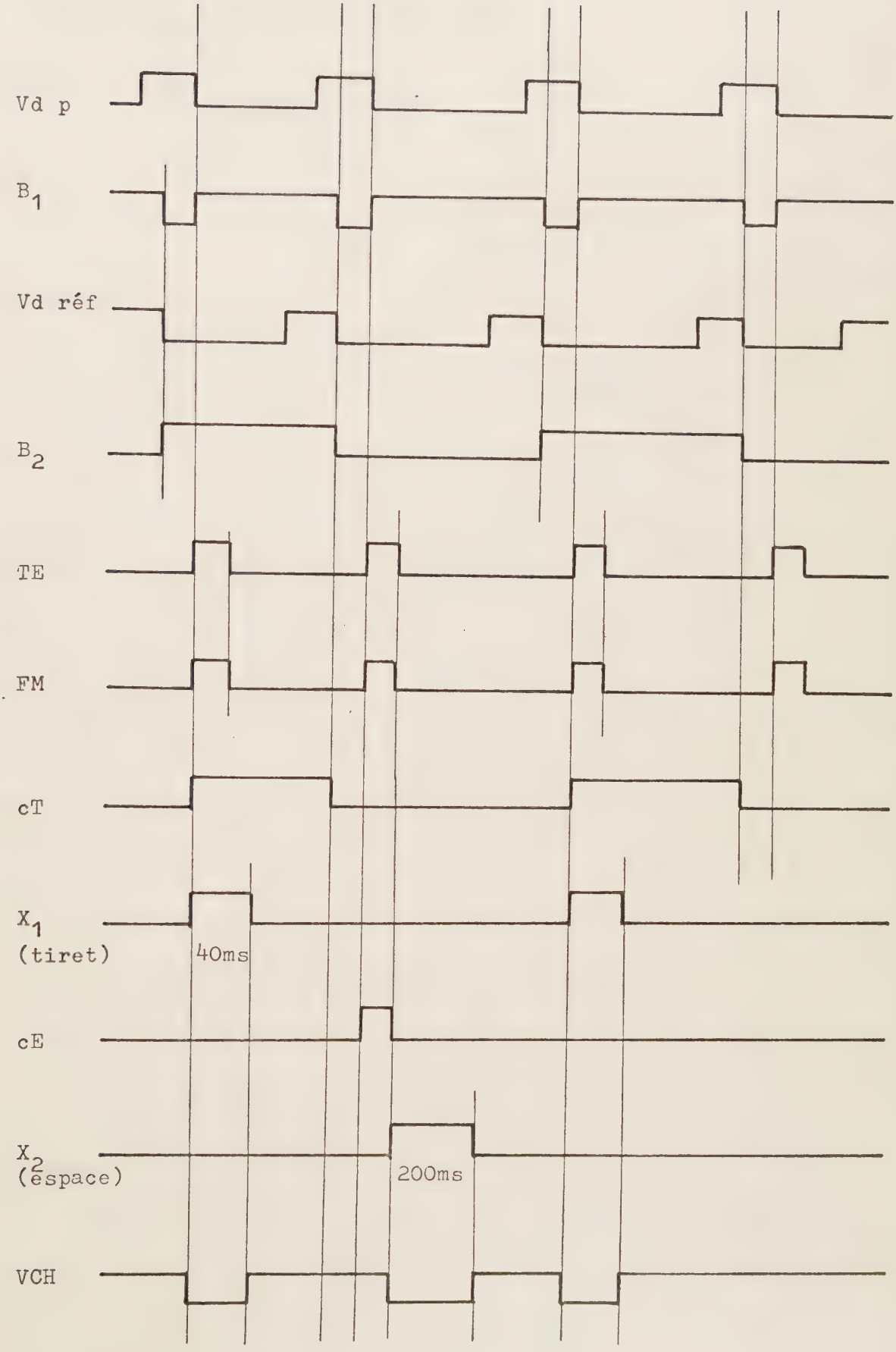
  B2 : diviseur par deux
- commande de l espace (cE): $\boxed{cE = (\overline{B2} \cdot \overline{FM}) + cmX}$

  cmX : bouton poussoir
- verrouillage du chariot suivant Ox (vCH) :

$$\boxed{vCH = \overline{cT} \cdot \overline{cE}}$$

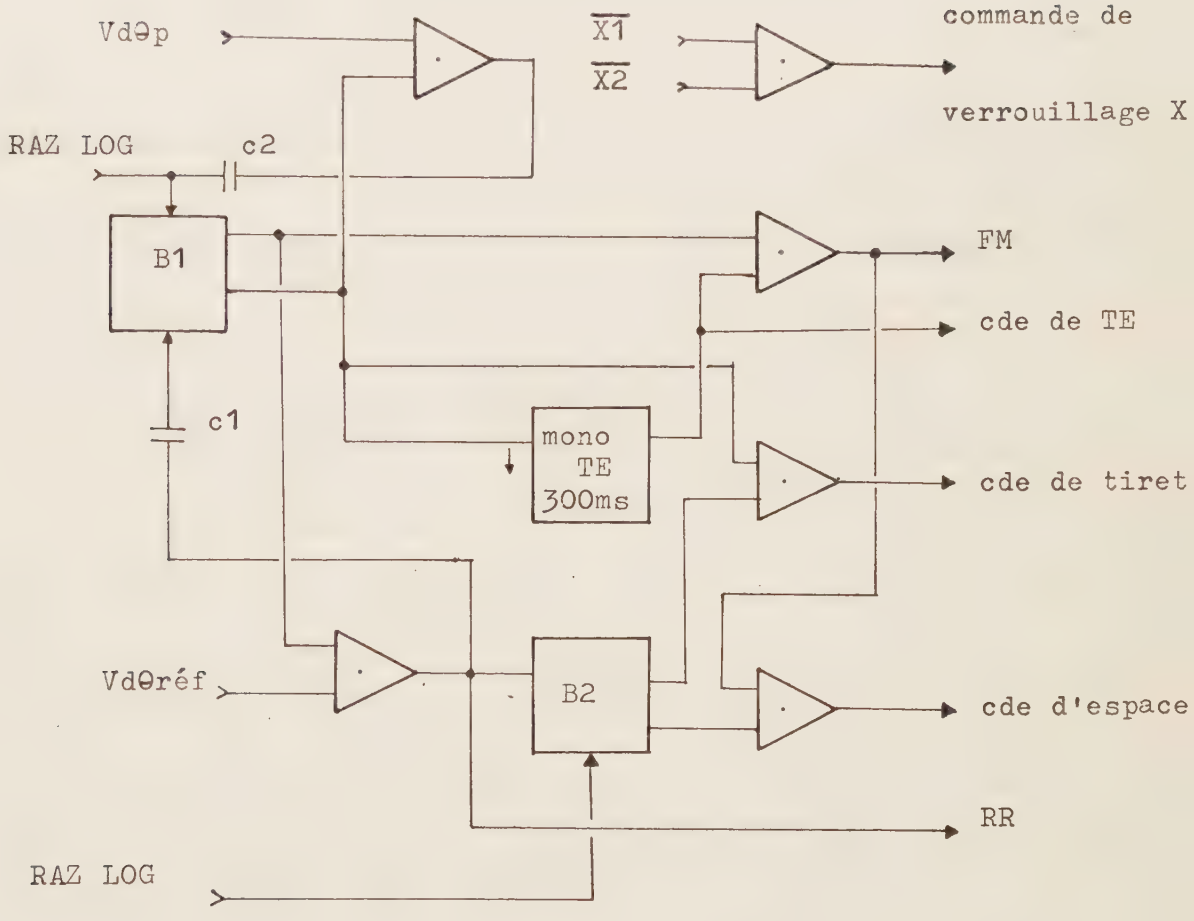
. . .

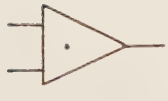
VI.3. Diagramme des signaux :



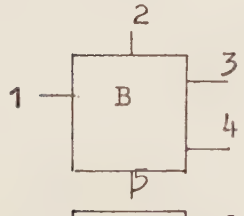
VI.4. REALISATION ET FONCTIONNEMENT :

VI.4.1. Schéma de principe :



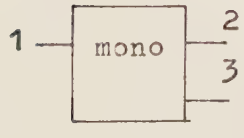


circuit " ET " à 2 entrées



circuit " bascule bistable "

1:entrée horloge
2: " directe C
3: " " 1
4:sortie $\overline{Q}$
5: " Q



circuit " monostable "

↓1:décl.front -
↑1: " " +
2:sortie directe Q
3: " inverse $\overline{Q}$

VI.4.2. Choix du matériel :

Nous utilisons des circuits SGS , série 74 , pour réaliser les fonctions suivantes :

- bascules bistables B1 et B2 : circuit 7474
- fonctions " ET " : circuits 7408

VI.4.2.1. Bascules bistables :

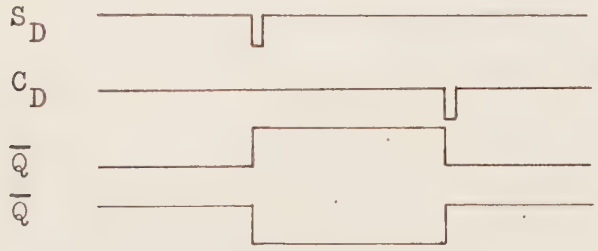
Les deux bascules B1 et B2 sont situées dans un même boitier.

figure VI.4.2.1

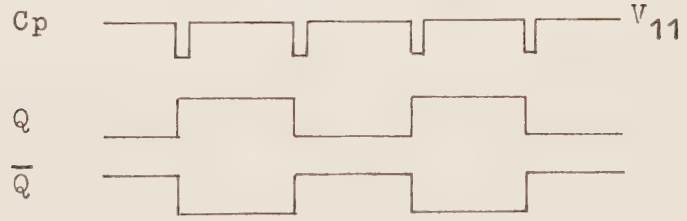
Ce circuit est alimenté en 5v et la tension minimum de commande est de 1v .

La bascule B1 est utilisée en commande directe :

- B1 (= 1) : V_5 = 4v et V_6 = 0v si V_4 = 0v (S_D)
- $\overline{B1}$ (= 0) : V_5 = 0v et V_6 = 4v si V_1 = 0v (C_D)



La bascule B2 est commandée par l'entrée d'horloge Cp (V_{11}). A chaque impulsion V_{11} , la bascule change d'état (il faut que l'entrée D soit reliée à la sortie $\overline{Q}$ c'est-à-dire V_8) .



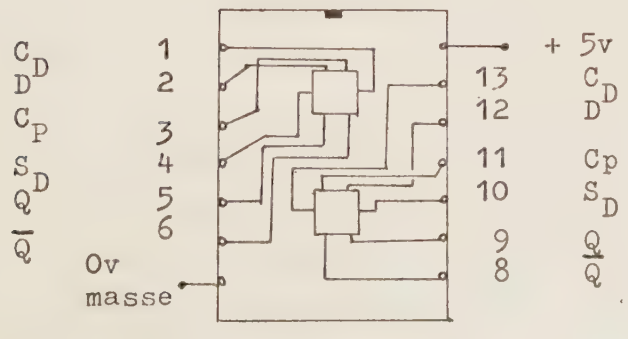


figure VI.4.2.1

circuit SGS type 7474

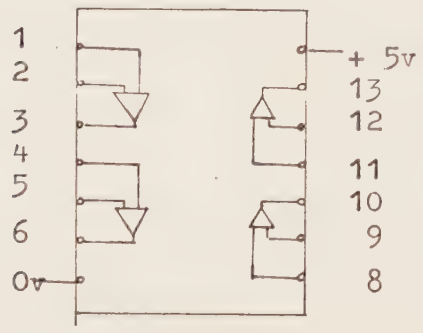
- vue de dessus -

Vcc = 5v et Icc = 17mA

VI.4.2.2. Fonctions " ET " :

Nous quatre circuits ET à deux entrées dans un même boitier (figure VI.4.2.2) . Nous utiliserons donc deux boitiers pour réaliser les six fonctions nécessaires .

figure VI.4.2.2



circuit SGS type 7408

table de vérité

entrée 1	entrée 2	sortie S
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

VI.4.2.3. Monostable TE :

Nous utilisons un circuit SGS type T113 - voir paragraphe IV.2.4 -

VI.4.3. Fonctionnement et montage réalisé :

Le montage représenté figure VI.4.3. est le complément des schémas décrits précédemment pour le repérage de Θp et $\Theta réf$ ainsi que pour l'enregistrement sur table X-Y .

Le signal de fin de mesure FM est détecté si TE et B1 sont à 1 état par l'intermédiaire de transistors , le relais R_{FM} est excité et ses 3 contacts fermés :

- le voyant rouge s'éclaire
- le haut parleur reçoit , du multivibrateur , un signal à 2000Hz et emet donc un bruit aigu
- si B2 est à " 1 " , nous avons une commande de tiret
- si B2 est à " 0 " , nous traçons un point car le stylet est abaissé en même temps que FM est détecté .

Quand $Vd\Theta réf$ est détecté , si B1 est à "1" , le signal de retour à la référence RR provoque l'excitation du relais R_{RR}, ce qui a pour effet :

- d'allumer le voyant vert RR
- d'alimenter le haut parleur avec une tension de fréquence basse pour obtenir un son grave (le changement de tonalité s'effectue en augmentant la valeur d'une capacité du multivibrateur) .

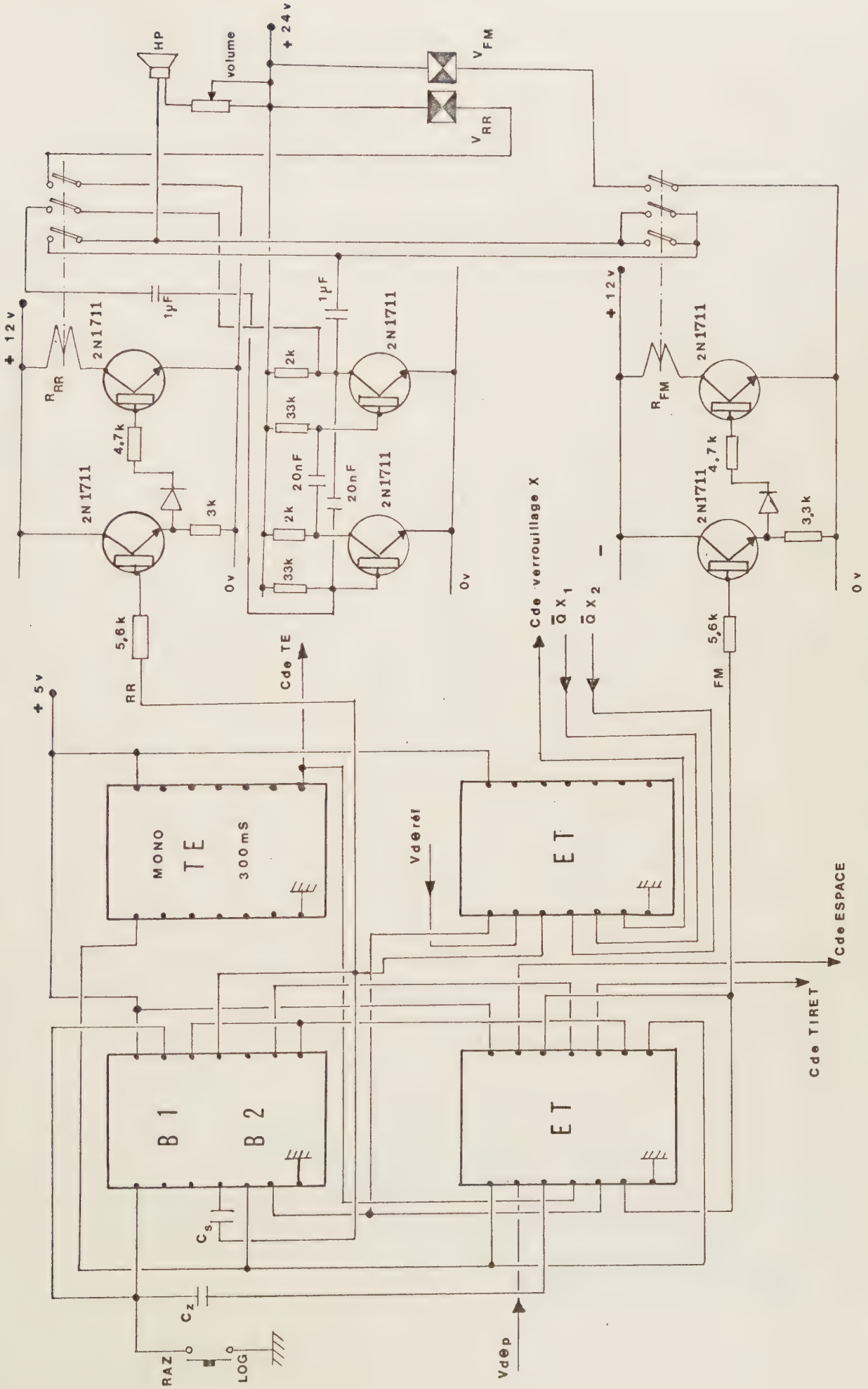

HP
volume
+ 24 v
V FM
V RR
+ 12 v
2N1711
1µF
R RR
4,7k
3k
2k
33k
20nF
0v
5,6k
RR
Cde TE
+ 5 v
MONO
TE
300 mS
B 1
B 2
C s
C z
RAZ
LOG
Vdep
Vderéf
ET
Cde verrouillage X
Q̄ X 1
Q̄ X 2
R FM
FM
3,3k
Cde ESPACE
Cde TIRET

figure IV.4.3

CHAPITRE 7

AVX
SON
IM
RR

VII . R E S U L T A T S & A P P L I C A T I O N S

VII. 1 . PERFORMANCES DE L'APPAREILLAGE :

VII.1.1. Qualité des mesures :

- les valeurs de Θp sont liées à celles de Θc, pour Θr donné , d'une façon sûre et reproductible
- la sensibilité pour Θp est de 1/20°C
- les dérives sur Θr et Θ sont inexistantes

VII.1.2. Cadence des mesures :

L'obtention de Θp en un temps court (1,5 seconde) permet de faire dix à vingt pointés par minute , selon la région cutanée explorée .

VII.1.3. Facilité d'emploi :

L'appareil est robuste , peu encombrant , facilement transportable et commode d'emploi . Un opérateur acquiert la maîtrise de son maniement en une heure .

VII.1.4. Enregistrement automatique des mesures :

Cette technique permet de réduire considérablement le temps d'interprétation des résultats lorsque des points symétriques doivent être comparés ; sur une même feuille d'examen , nous pouvons tracer seize courbes de six points chacune , ce qui correspond à l'examen complet d'un patient .

VII. 2 . PRESENTATION :

Le capteur se présente sous la forme d'un appareil compact parallèlépipèdique (photo 1) de dimensions 42 X 10 X 45 cm .

. . .

Une poignée support facilite son transport et son poids est d'environ 6 kg .

La sonde est aisément raccordée à l'appareillage au moyen d'un connecteur .

Sur la face avant , nous trouvons :

- un galvanomètre à zéro central indiquant $V^m s1$
- une commande du potentiomètre " Mesure " relié à un vernier gradué en °C , ce qui tient lieu de " Référence mesure "
- une commande du potentiomètre de réglage de V" .
- un voyant rouge qui s'allume 1 mesure sur 2 (pour les point droits , par exemple) .
- un voyant rouge "FM" (fin de mesure)
- un voyant vert " RR " (retour à la référence)
- un interrupteur " Marche - Arrêt "
- un voyant " Marche - Arrêt "
- un bouton poussoir de commande de décalage X
- un interrupteur interdisant la commande du stylet scripteur
- un galvanomètre à zéro central indiquant l'écart mesure-consigne .
- une commande du potentiomètre Régulation relié à un vernier gradué en °C , qui tient lieu de consigne de température .
- un commutateur " ADP - REG " permettant de faire fonctionner le capteur en adaptateur de température .

La sonde a les dimensions d'un crayon à bille courant (photo N° 1)

Les circuits sont réalisés sur des plaquettes de bakélite :

- circuit de mesure (photo N°3)
- " " régulation (photo N°4)
- " " la logique (photo N°5)

. . .

photo 4

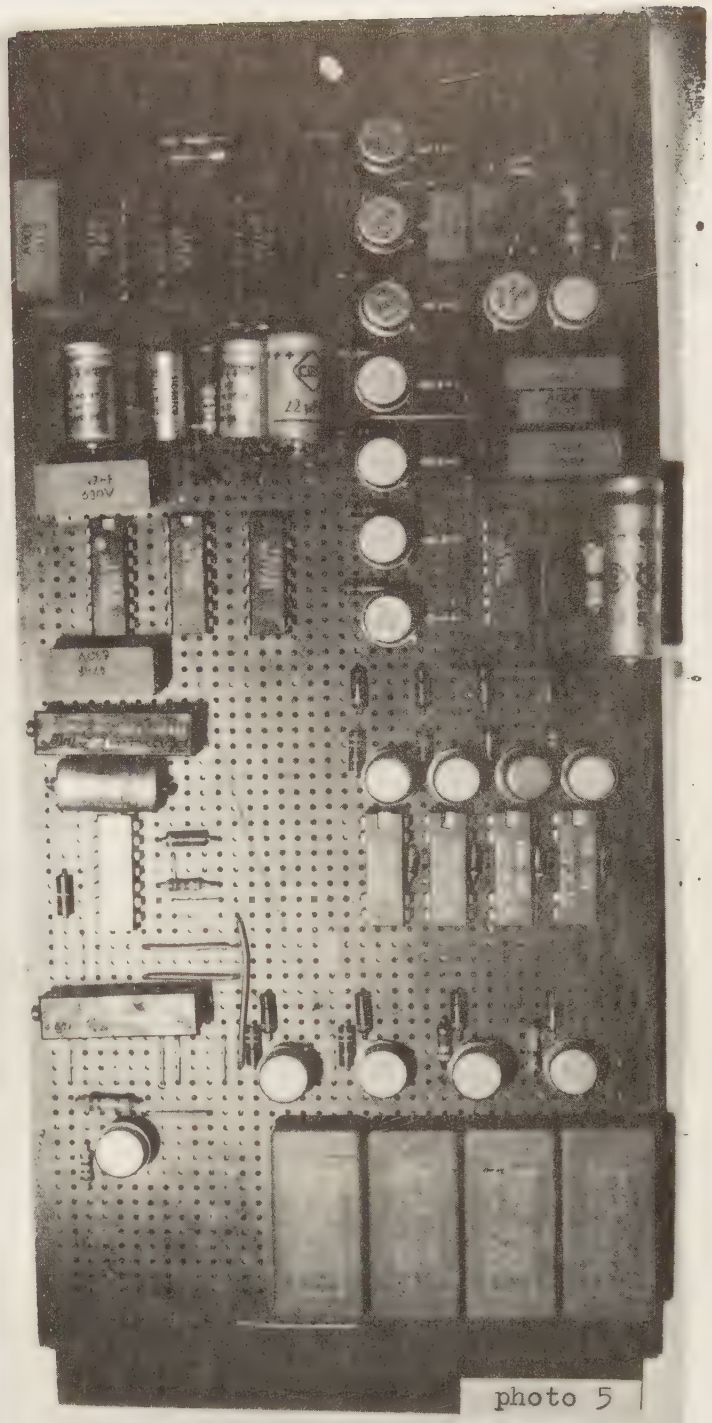


photo 5

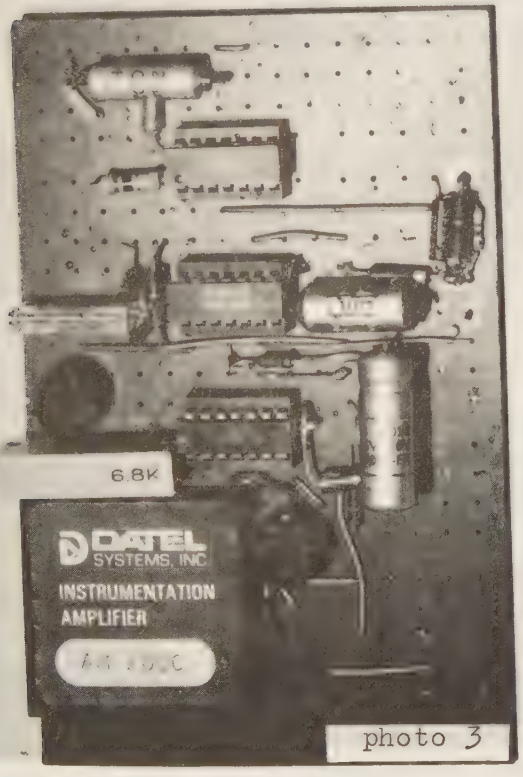


photo 3

VII. 3 . APPLICATIONS MEDICALES :

VII.3.1. En neurologie :

VII.3.1.1. Protocole de l'enregistrement thermométrique :

Les patients sont mis au repos , en décubitus dorsal , dans une salle d'examen à température stable , voisine de 20°C , pendant au moins 10 minutes .

Les points cutanés , où vont s'effectuer les mesures , sont alors repérés (ces points sont choisis pour localiser , avec suffisamment de précision , les altérations thermiques) :

- sur le front : quarante huit points sont définis , répartis en 4 lignes horizontales F1 , F2 , F3 , F4 (figure VII.3.1.1 de douze points chacune .

- sur la ligne oculaire : qui comporte , de chaque coté de la ligne médiane , deux points sur la paupière et deux plus externes .

Afin de permettre d'éliminer ultérieurement d'éventuelles assymétries d'origines neurologiques concernant tout un hémicorps ou une hémiface des mesures sont réalisées :

- sur les joues : 3 points de chaque coté

- sur les membres : 9 points sur chaque membre répartis de la racine à l'extrémité , à raison de 3 points sur chaque segment .

Au total , l'enregistrement thermométrique conduit à effectuer 98 repérages et dure 15 à 20 minutes .

. . .

REPERAGE DES POINTS CUTANES AU NIVEAU DU VISAGE

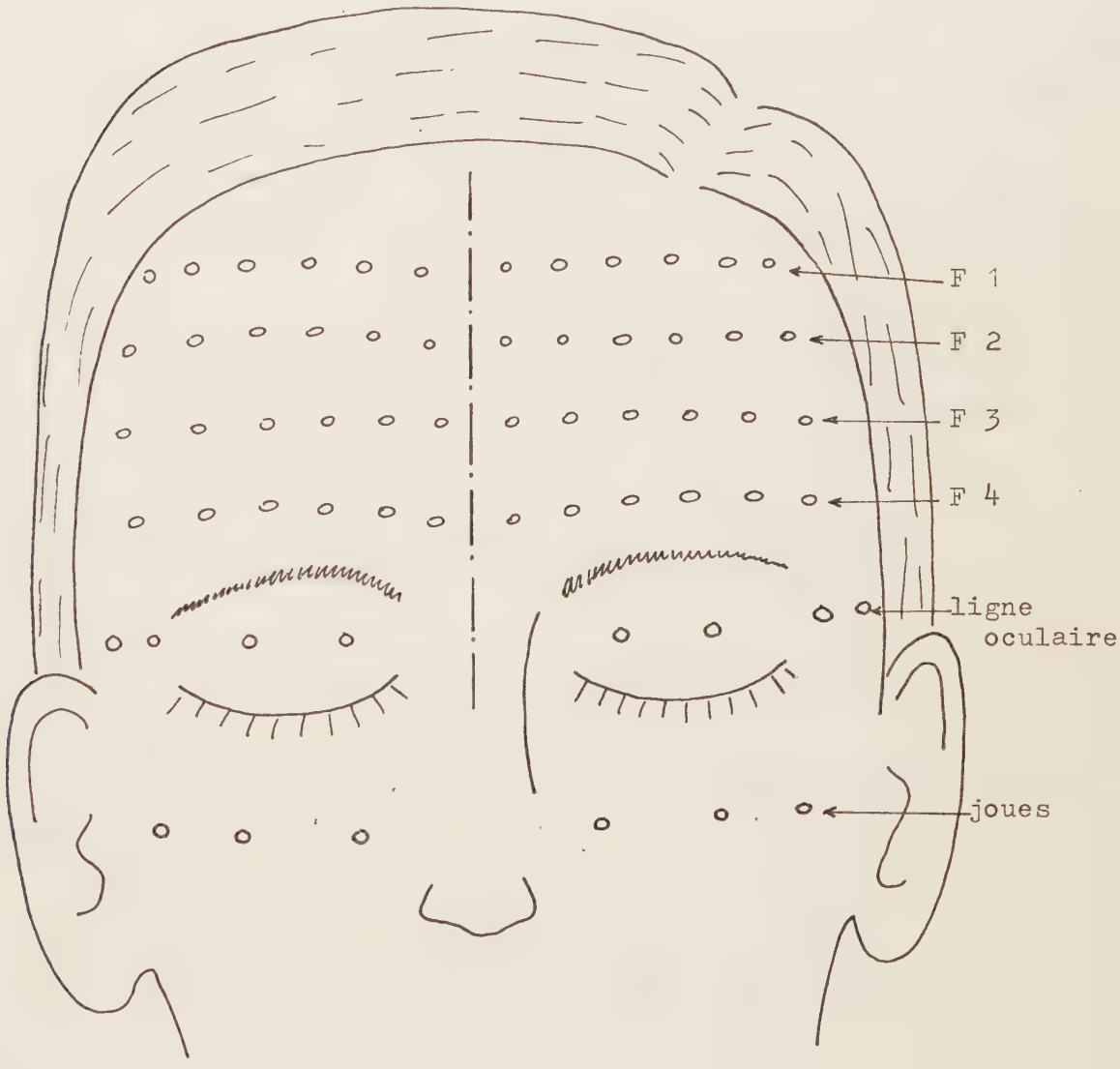


fig.VII.3.1.1

VII.3.1.2. Exemples de résultats thermographiques :

SUJET SAIN : figure VII.3.1.2a

- au niveau du visage : il n existe pas de symétrie parfaite au niveau du front mais les lignes frontales ont sensiblement le même profil thermique et une température proche . La ligne médiane est plus froide . Les lignes sus-orbitaires et oculaires montrent un net refroidissement au niveau des crêtes osseuses .

- au niveau des membres inférieurs : les températures , sensiblement symétriques , décroissent nettement de la racine vers les extrémités .

SUJET ATTEINT DE THROMBOSE DE LA CAROTIDE INTERNE DROITE : figure VII.3.1.2.b

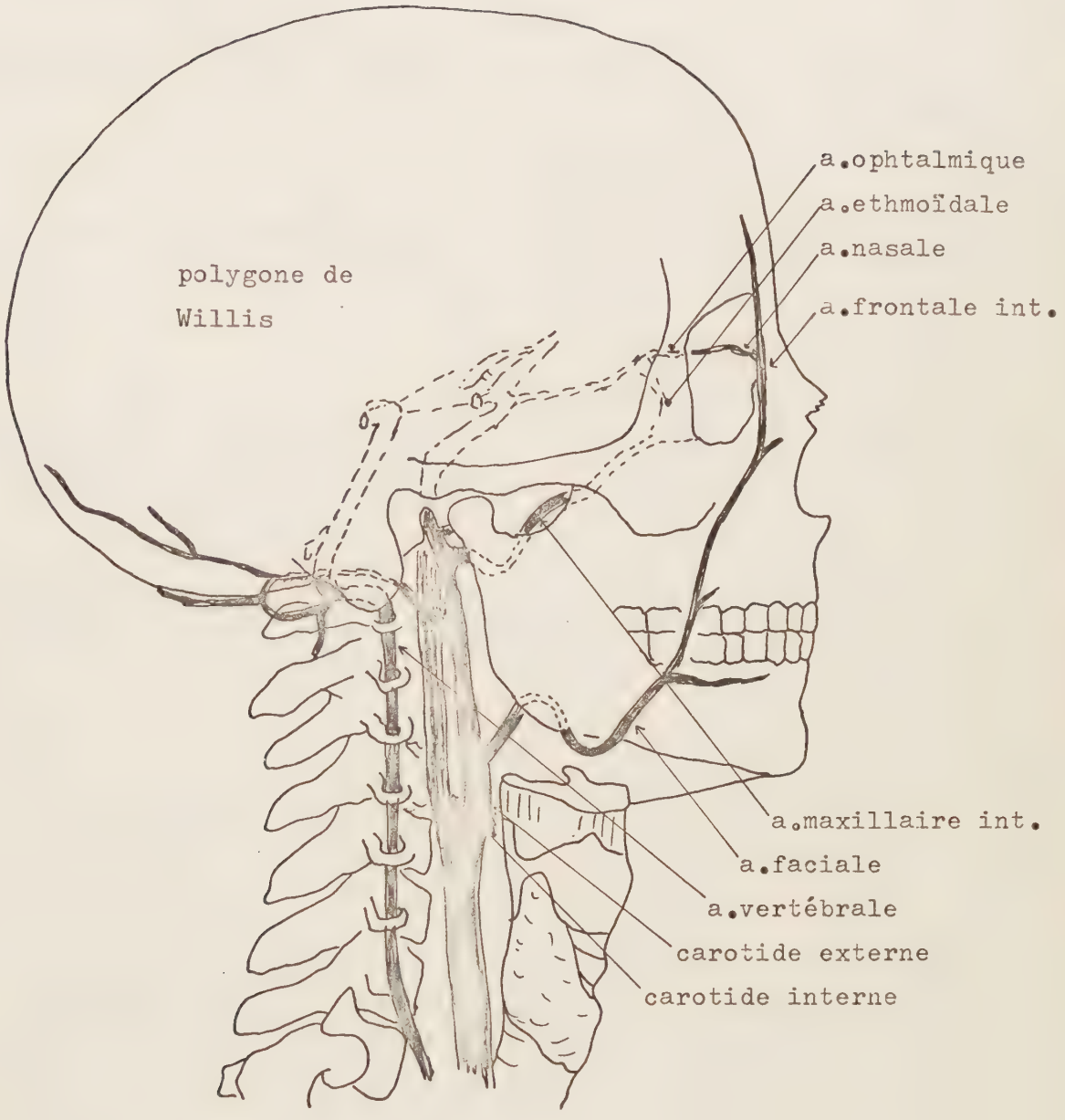
Le tracé des courbes - surtout de F4 et de la ligne oculaire - met en évidence la forte dissymétrie thermique .
Les écarts chiffrés de température permettent de tracer le triangle caractéristique de WOOD qui comporte :

- les deux points palpébraux
- les trois points de F4
- les deux premiers points de F3

SUJET APPAREMMENT SAIN : figure VII.3.1.2c

Ces relevés thermiques ne font pas apparaitre d'assymétrie notable . Cependant , la pente de l·enregistrement,F4 en particulier, fait apparaitre un refroidissement des zones frontales des deux cotés : le malade est porteur d'une insuffisance carotidienne bilatérale - thrombose de la carotide interne gauche et sténose de la carotide interne droite -

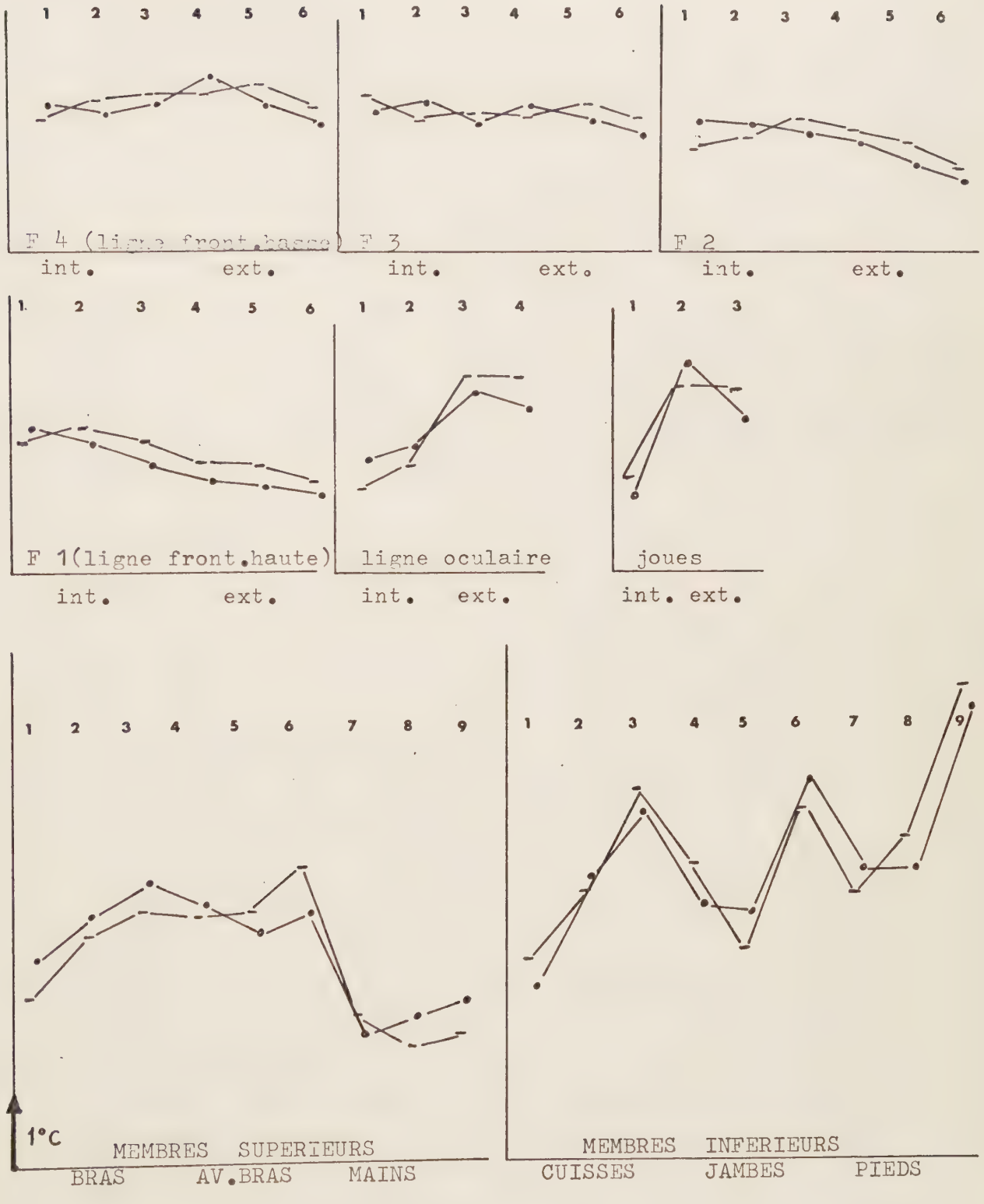
. . .



SCHEMA MONTRANT LES PRINCIPALES VOIES ANASTOMOTIQUES

ENTRE LES RESEAUX CAROTIDIENS INTERNES ET EXTERNES .

Date : Nom : Service :

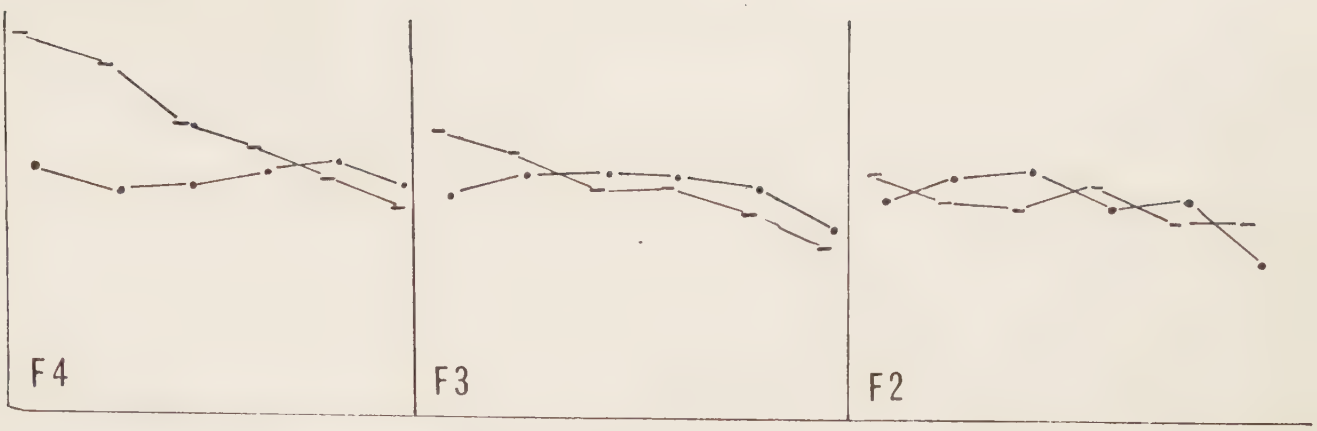


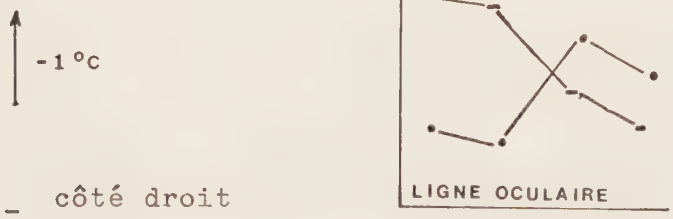
— Côté droit

• Côté gauche

DIAGRAMME NORMAL

fig.VII.3.1.2 a





OBSERVATION 28 : Mr R...A.
68ans

Thrombose de la carotide interne droite

_ côté droit

• côté gauche

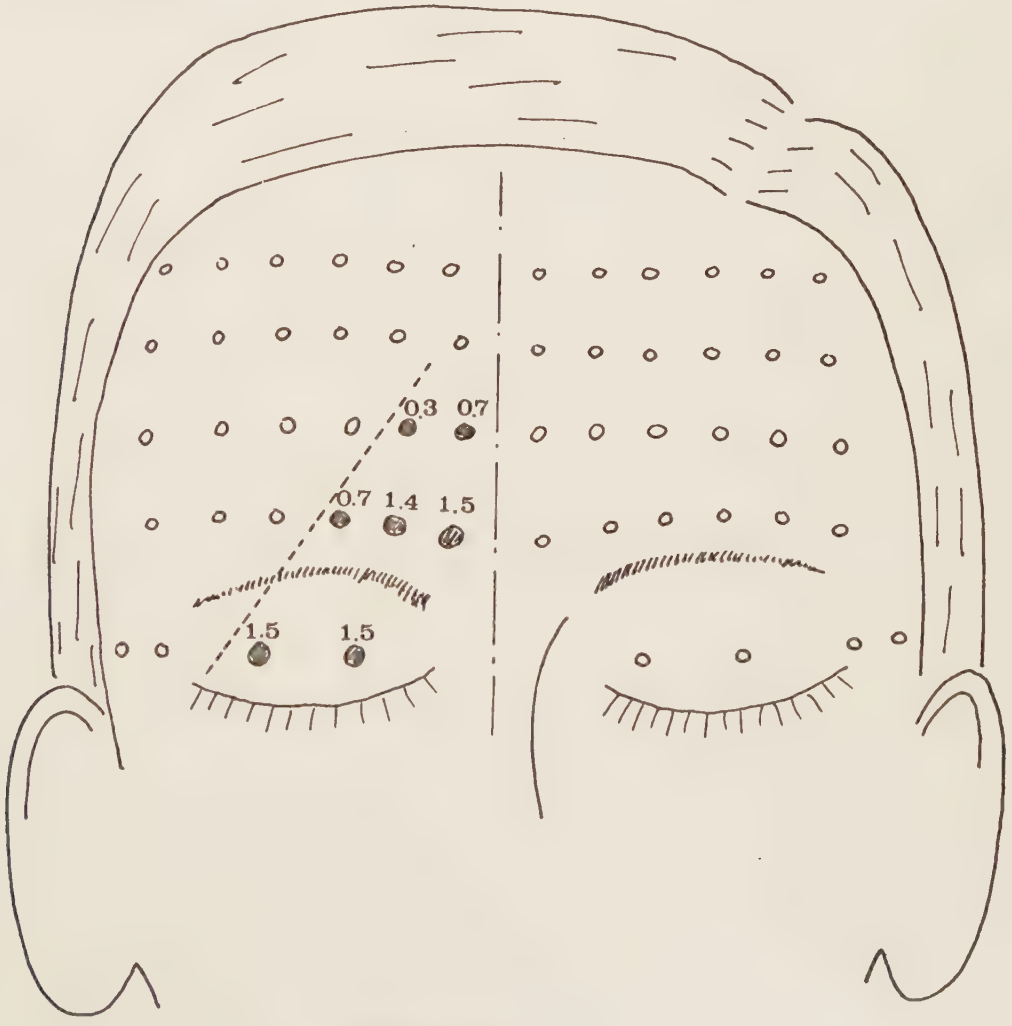


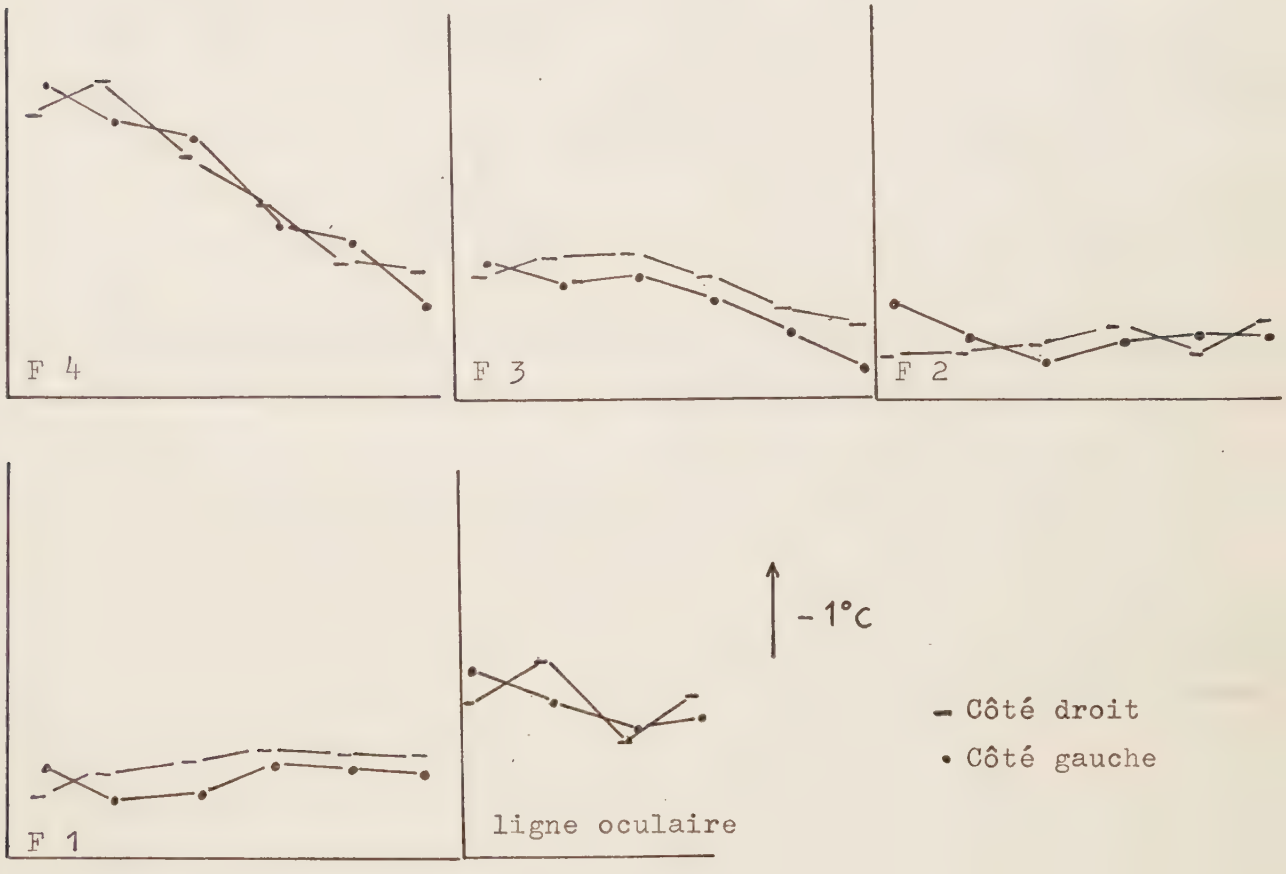
fig. VII.3.1.2 b

- THERMOGRAPHIE -

OBSERVATION 46 : Mr H...V. 55ans

Thrombose de la carotide interne gauche

Sténose de la carotide interne droite



PAS D'ASYMETRIE NOTABLE : les zones frontales internes sont refroidies des deux côtés .

fig.VII.3.1.2 c

VII.3.2. Mastopathies :

Une étude comparative entre la méthode de mesure de la température par plaque cholestérique et notre sonde a été effectuée au Centre de Thermographie Clinique , à l'hôpital de BOBIGNY .
Utilisées dans le dépistage précoce du cancer du sein , ces deux méthodes ont donné des résultats bien sûr analogues , mais la sonde a permis , en plus , de chiffrer les écarts lors des relevés

- sur le mamelon
- sur la zone suspecte

La méthode ponctuelle apporte donc un élément précis et rapide dans la détermination et la localisation des points chauds ou froids

conclusion

C O N C L U S I O N

° ° °

Les perfectionnements apportés au capteur à sonde thermométrique de surface régulée en température permettent de

- réduire la durée de l'examen
- faciliter l'interprétation des relevés
- grouper tous les relevés d'un examen sur une même feuille
- d'augmenter la sensibilité (qui atteint 1/20°C
- diminuer le prix de revient de l'appareillage (enregistreur peu coûteux)
- simplifier l'emploi
- le transporter facilement .

Dans les domaines clinique , physiologique ou pharmacologique , cet appareillage permet la mesure précise des différences de température cutanée des territoires vasculaires ou neurologiques .

Pouvant être employé seul ou en complémentarité avec les techniques globales : caméra à infra - rouge ou plaque à cristaux cholestériques nous pouvons penser que cet appareillage verra son utilisation se généraliser rapidement .

bibliographie

B I B L I O G R A P H I E

(1) Thermocinétique de la mesure de la température cutanée par sonde thermoélectrique de contact,applications médicales . Annales de Physique biologique et médicale , vol.8, n°1, janvier 1974 par J. GOUAULT ,J. C. MEURGEY , M. SAMSON , J. CHOMANT et S. COEN

(2) Capteur à sonde thermoélectrique de contact régulé en température . Société française des Thermiciens - GUT p. 187-212 , 20 fév.75 par J, GOUAULT , M. SAMSON , J.C. MEURGEY ,J. CHOMANT et S. COEN

(3) Méthode simple de mesure de température cutanée - Applications aux thromboses de la carotide . Revue neurologique - Paris 1968,t. 119, p. 485-494 par M. SAMSON,J. GOUAULT, A. FAURE, J.M. AVENEL ,D. SAMSON-DOLFUS

(4) Intéret de l'enregistrement thermométrique du front dans la pathologie carotidienne . Société d'Otoneurologie , 1973, 45 p. 169-183 par M. SAMSON, J. GOUAULT, J. CHOMANT

(5) Contribution de l'enregistrement thermométrique cutané à l'étude fonctionnelle de la circulation carotidienne Revue E.E.G. , Paris 1974 , t.4 ,n° 3, p. 237-239 par J. CHOMANT , J. GOUAULT et M. SAMSON

(6) Contribution à la mesure de la température superficielle des corps solides
Thèse de Doc. Ing. - 13 juin 1969 - Faculté des Sciences de Rouen par A. FAURE

(7) Capteur thermoélectrique de mesure, par contact , de la température superficielle de la peau . Mémoire CNAM Paris, oct. 1970 , par J.C. MEURGEY

(8) Applications neurologiques d'une méthode simple de thermographie cutanée . Thèse Fac. de Médecine de Rouen 1968 par J.M.AVENEL

(9) Approche sémiologique des différences de température en neurologie . Thèse Fac. de Médecine de Rouen - 1972 -par M.A. BOUTIN

(10) Analyse des profils thermiques de la face dans les thromboses et sténoses de la carotide interne exo-cranienne Thèse Fac. de Médecine de Rouen -1973- par J. CHOMANT

(11) Thermographie cutanée par sonde thermoélectrique de contact Thèse Doc.Ing.- Fac. des Sciences de Rounen,1974- par S.COEN

(12) Capteur thermométrique pour la mesure des températures superficielles . Brevet ANVAR n° 69.15220 par J. GOUAULT, M. SAMSON et A. FAURE

(13) Contribution à l'étude de l'effusivité thermique Thèse de Doc. 3ème cycle - 25 janv. 72 - Université de Paris VI , par J. BRANSIER

(14) Thermography in the diagnosis of cerebrovascular disease preliminary report . Radiology, 1964 P. 540-542 by E. WOOD

(15) Le rôle de la circulation dans les échanges thermiques par R. LEMAIRE
La peau, organe d'échanges calorifiques entre l'homme et l'environnement , par M. GAUTHERIE
S.F.T. Journées de Caen - 9-10 mai 1973

(16) Physiologie, tome 1, Régulation thermique ch. 13 ; Flammarion , 1970 par C. KAYSER

(17) Mesures précises de températures cutanées . Pathologie Biologie , juin-juillet 1972, vol. 20 , n°11-12-13-14 par M. GAUTHERIE, M. WATTEAU, U. OTT, et Y. QUENNEVILLE

(18) Thermographie et diagnostic des petites tumeurs du sein Presse médicale, 28 avril 1973(n°17) par J. TRICOIRE, S. MARIEL et J.P. AMIEL

(19) Appariel de relevé de température superficielle , notamment cutanée . Brevet par J. GOUAULT, J.C. MEURGEY, M. SAMSON et J. CHOMANT

(20) Thermocinétique - 1949 -(Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air, n°224) par P. VERNOTTE

(21) Théorie et calcul des asservissements linéaires . Libr. Dunod , 1971 par J.Ch. GILLE, P. DECAULNE et M. PELLEGRIN

(22) Electronique -4tomes- Presses Universitaires de France par R. GUILLIEN

(23) Les amplificateurs opérationnels . Lib. Masson par MARCHAIS

Nota : Dans les publications (6),(11),(13),(16),(17),(18), il est donné une abondante bibliographie sur la mesure des températures superficielles de la peau .